
En defensa del aire

Debemos al oxígeno la vida. Y al aire,
que la sangre ría alegre.
No puedo asegurar que exista
un hacedor de estrellas
pero cuando respiro, sé que se aumenta el mundo.
No sé por qué los astros nos vigilan, atentos, desde su eternidad.
Pero sé que el suspiro de la vida sólo es posible
porque late, limpio, el aire que nos besa.
Somos, sólo, el susurro de la brisa auroral,
el latido vibrante de la música aérea,
el roce milagroso del beso del oxígeno
y como la alegría, sólo sabe brillar.
Defendamos el aire, ingrátido y amante,
defendamos su etérea dimensión intangible,
quién podría cantar sin su armónico palpito,
quién podría gritar, pedir socorro, sin su filo candente.
Defendamos al aire.
Defendamos al aire como el árbol la savia.
Todo lo que respira, debe su vida al aire.
Todo lo que consuela, debe su llanto al aire.
Todo lo que defiende debe su aliento al aire.
No maltratéis al aire, hijos del sol y el tiempo,
hijos del mar y el viento,
nuestra estirpe es el aire,
nuestra cuna es el aire
en el nombre sagrado de la vida no mancilléis el aire.
ni la cuna, ni el mundo.

Resumen

En la actualidad, cada vez son más las ciudades que tienen un exceso de contaminantes en la atmósfera que respiran sus ciudadanos. Uno de estos contaminantes son las partículas microscópicas, que cuando son menores de $10\mu\text{m}$ son muy peligrosas para las personas que las respiran.

Las ciudades con muchos recursos económicos utilizan sistemas de análisis de partículas mediante la técnica de atenuación de radiación beta. Este sistema garantiza, por un precio de aproximadamente 125000€, una alta eficiencia a la hora de calcular la concentración de estas partículas en el aire.

Debido al elevado precio que conlleva saber cuál es la calidad del aire que respiramos y que no todo el mundo puede permitirse la instalación de este sistema, este proyecto se realizó con el objetivo de desarrollar un nuevo sistema mucho más económico y de prestaciones similares. Para ello se ha diseñado un impactador en cascada que separará las partículas del aire y se ha programado en Matlab un código que, mediante un microscopio y el reconocimiento de imagen, calcula cuantas partículas se han absorbido, dando la concentración en el aire y mostrándonos cuál es la calidad de éste de forma continua.

Contenido

1. Prefacio	9
2. Introducción	11
2.1. Objetivos del proyecto.....	11
2.2. Alcance del proyecto.....	11
3. Las partículas en el aire y su clasificación.....	13
3.1. El origen de las partículas.....	13
3.2. El tamaño y forma de las partículas	14
3.2.1. Partículas torácicas (PM ₁₀)	15
3.2.2. Partículas respirables (PM _{2,5}).....	15
3.3. Fuentes emisoras de las partículas.....	16
4. Comportamiento de las partículas en el aire	19
4.1. Sedimentación	20
4.2. Impacto inercial.....	22
5. Efectos en la salud.....	25
6. Efectos en el medioambiente	29
7. Legislación y normativa.....	31
7.1. Europea	31
7.2. Internacional	31
7.3. Normativa	32
8. Medición de la calidad del aire	33
8.1. Métodos de captación de referencia	33
8.1.1. Captador de referencia para PM ₁₀	34
8.1.2. Captador de referencia para PM _{2,5}	35

8.2.	Métodos de análisis discontinuos. El método gravimétrico.....	36
8.3.	Métodos de análisis continuos de referencia.....	36
8.3.1.	Atenuación de radiación β	36
8.3.2.	Transductor de elemento oscilante	38
9.	Alternativa propuesta	39
9.1.	Sistema actual	39
9.2.	Alternativa para el captador: El impactador en cascada	40
9.3.	Alternativa para el análisis: El microscópico óptico de exploración	45
9.4.	Programación en MATLAB.....	46
9.5.	Montaje definitivo	52
9.6.	Otras alternativas.....	54
10.	Estudio económico	57
10.1.	Coste del proyecto.....	57
10.2.	Coste de la alternativa	58
10.3.	Coste del sistema de referencia	60
10.4.	Comparativa económica	61
11.	Estudio de impacto ambiental y social	63
12.	Cronograma para la realización del prototipo	65
13.	Conclusiones.....	67
14.	Agradecimientos.....	69
15.	Bibliografía	71
16.	Lista de abreviaciones y símbolos	75
Anexo A.	Algoritmos en Matlab	77
Anexo B.	Planos del prototipo	97

1. Prefacio

La contaminación atmosférica se ha convertido en nuestros días en un problema de la salud casi comparable al tabaquismo en cuanto a su impacto en el conjunto de la población (Sunyer, 2013). Es por eso que un control intensivo de la calidad del aire que respiramos es esencial en una sociedad tan contaminada como la nuestra. ¿Qué métodos utilizamos para medir la calidad del aire?, ¿puede tener acceso todo el mundo al uso de estos instrumentos? Y si no, ¿qué propuestas existen para garantizar un conocimiento global de la calidad del aire? Son algunas de las preguntas que nos hacemos antes de empezar éste proyecto.

La elección de este proyecto viene debido a mis problemas de salud con el asma, ya que la contaminación del aire ha sido un tema que me ha interesado mucho, sobre todo desde que vine a vivir a la ciudad de Barcelona y vi incrementar mis síntomas de manera exponencial.

Por este motivo quería realizar un proyecto final de carrera relacionado con el aire y con la ingeniería ambiental. Este proyecto ha sido una inyección de motivación personal muy elevada ya que aparte de mejorar mucho mis conocimientos tanto en el tema de la contaminación aérea como en programación con Matlab y diseño con SolidWorks, a medida que el proyecto iba avanzando me iba introduciendo en éste cada vez más hasta darme cuenta de que realmente podía llegar a ser un método real y utilizado.

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto se centra en diseñar un nuevo método para el análisis de partículas contaminantes en el aire y que comparativamente con el método de referencia sea mucho más económico y de eficiencia lo más alta posible. Un método de referencia que mediante la tecnología de atenuación radiación beta consigue una altísima eficiencia.

Para ello, el proyecto se divide en tres partes. Primero en hacer una búsqueda exhaustiva sobre las partículas contaminantes en el aire y los diferentes métodos de captación y análisis que existen. El segundo punto es el diseño de un sistema alternativo, mediante un impactador en cascada y un sistema óptico que combinará el uso de un microscopio óptico con una tecnología de conteo de partículas que ha sido desarrollada a lo largo de este proyecto. Por último, una comparativa tanto económica como ambiental y social de la alternativa diseñada respecto del método de referencia actual.

2.2. Alcance del proyecto

Como en todo proyecto, es casi imposible hacer un análisis profundo en cada uno de los temas surgidos, por eso se han fijado varios aspectos en los que se centrará el proyecto y otros en los que no.

Solamente se analizarán las partículas en el aire con un rango de entre $10\mu\text{m}$ y $1\mu\text{m}$, por lo tanto se descartan tanto las demás partículas como otros posibles contaminantes que están en el aire.

No se va a tener en cuenta cómo construir el impactador en cascada ya que en la realidad se encargaría la construcción a una carpintería de aluminio aportándoles los planos.

Tampoco se tiene en cuenta el diseño del rodillo que hará girar las fibras de vidrio ni el diseño electrónico de las piezas del conjunto del sistema.

3. Las partículas en el aire y su clasificación

Antes de centrarnos en las partículas, merece la pena definir el concepto contaminante. *Un contaminante es toda sustancia ajena a la composición de la atmósfera que pasa a ella y permanece allí durante un tiempo. En esta categoría también se incluyen todas aquellas sustancias que conforman la atmósfera pero que se presentan en concentraciones superiores a las naturales* (Generalitat de Catalunya, 2005).

Algunos de los contaminantes que se estudian actualmente en el aire son los siguientes: partículas, compuestos de azufre, compuestos de nitrógeno, compuestos de carbono, halógenos y compuestos halogenados y oxidantes fotoquímicos¹.

En este proyecto se van a tratar las partículas en el aire o aerosoles, también llamadas, material particulado (del inglés *Particulate Matter* o PM). Se puede definir el concepto aerosol como el conjunto de sólidos o líquidos suspendidos en un gas. El concepto de aerosol incluye tanto a las partículas como al mismo gas, que normalmente será aire. El rango de las partículas en un aerosol va desde los 0,002 micrómetros hasta más de 100 micrómetros.

Existen muchas formas diversas de clasificar las partículas en el aire, a continuación se detallan las principales.

3.1. El origen de las partículas

Como con la mayoría de los contaminantes, la primera clasificación se hace según el origen de las partículas (no confundir con la fuente de las partículas, aspecto que se verá más adelante).

Partículas primarias: Son las partículas que llegan directamente al aire sin sufrir ningún cambio desde que son emitidas por su fuente. Dos claros ejemplos son el humo de los coches y el polvo del suelo.

Partículas secundarias: Son las partículas que se forman en el aire como resultado de una reacción química. A partir de ciertos gases como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y otros gases que encontramos en la atmósfera se forman partículas de, entre otros, sulfatos y nitratos.

¹ Más conocido como smog fotoquímico

3.2. El tamaño y forma de las partículas

Clasificarlas según su tamaño seguramente sea la más importante de todas. Debido a la irregularidad en su forma, las partículas no son perfectamente esféricas y por lo tanto, no podemos hablar de su diámetro. En la Figura 3.1, se observa la variedad morfológica de las partículas. En este caso, una muestra de partículas de serrín observada en el microscopio a 10 aumentos.

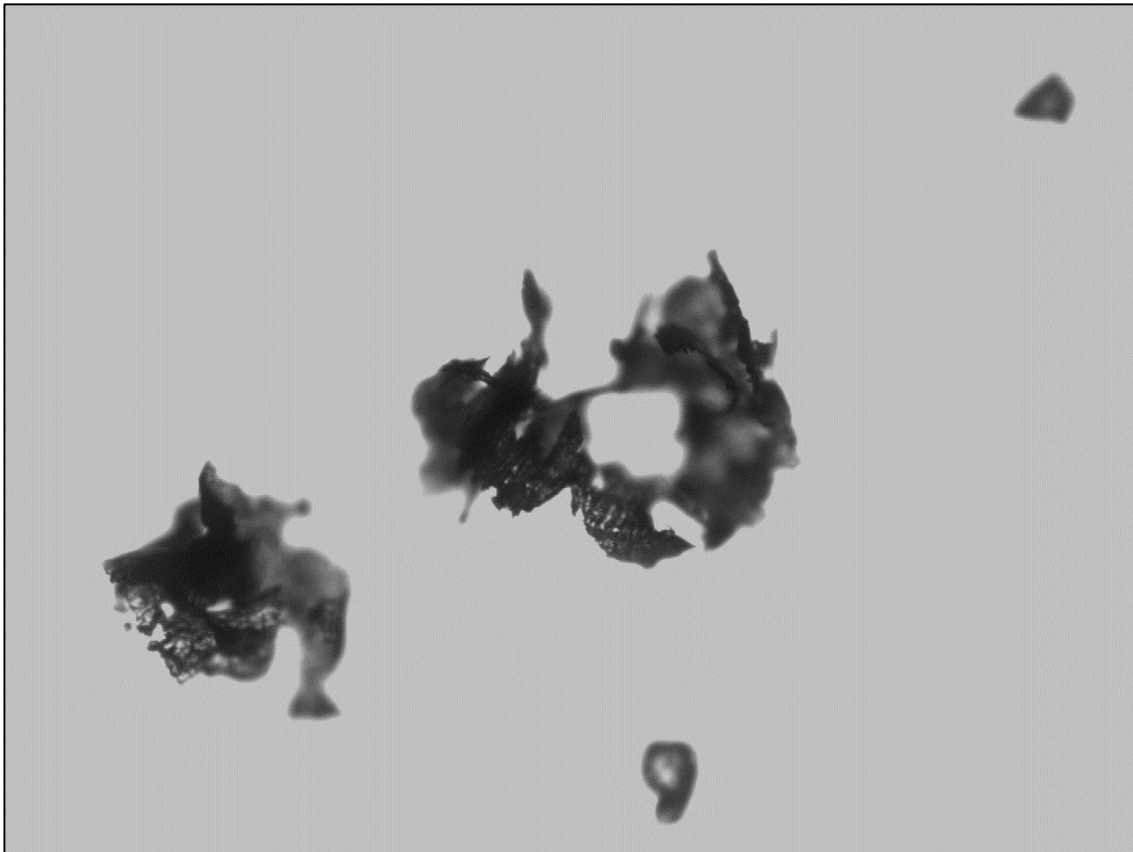


Figura 3.1. Morfología de las partículas

Para solventar este problema existe el concepto de diámetro aerodinámico, que queda definido como el diámetro de una partícula esférica con densidad igual a 1000 kg/m^3 y con la misma velocidad de sedimentación² que la partícula irregular (Hinds, 1999). A continuación, cuándo se hable de diámetro, se hará referencia al diámetro aerodinámico.

² Una vez las partículas están en suspensión, consiguen rápidamente una velocidad constante, la cuál será la máxima alcanzable. A esta velocidad máxima se la conoce como velocidad de sedimentación o velocidad de asentamiento.

Partículas sedimentables: Consideramos partículas sedimentables aquellas con un diámetro superior a 10 micrómetros. Debido a su gran tamaño permanecen poco tiempo en el aire por lo que sus principales efectos únicamente serán remarcables en la proximidad de la fuente. Su tamaño es lo suficientemente grande como para no causar problemas.

Partículas en suspensión: Se habla de partículas en suspensión todas aquellas con un diámetro inferior a 10 micrómetros. Estas pequeñas partículas se pueden dividir en dos importantes bloques: PM_{10} y $PM_{2,5}$ (La Figura 3.2 puede aclarar la proporción de los tamaños de las partículas).

3.2.1. Partículas torácicas (PM_{10})

Son las partículas con un diámetro inferior a 10 micrómetros. A la fracción entre 10 micrómetros y 2,5 micrómetros se la conoce como fracción gruesa. Esta fracción suele estar compuesta por polvo, polen y metales pesados procedentes del suelo en forma de silicatos y aluminatos.

3.2.2. Partículas respirables ($PM_{2,5}$)

Son las partículas con un diámetro igual o menor a 2,5 micras. A la fracción entre 2,5 micrómetros y 1 micrómetro se la conoce como fracción fina. Esta fracción suele estar formada por carbono orgánico, carbono elemental, componentes orgánicos e hidrocarburos.

Para diámetros menores a 1 micrómetro se hace referencia a la fracción ultrafina, formada por productos de combustión. Para poder detectar las partículas ultrafinas se necesitan herramientas muy potentes -y es un tema en el que aún se tiene un largo camino de investigación por delante- por ello, nos centraremos en las fracciones gruesas y finas.

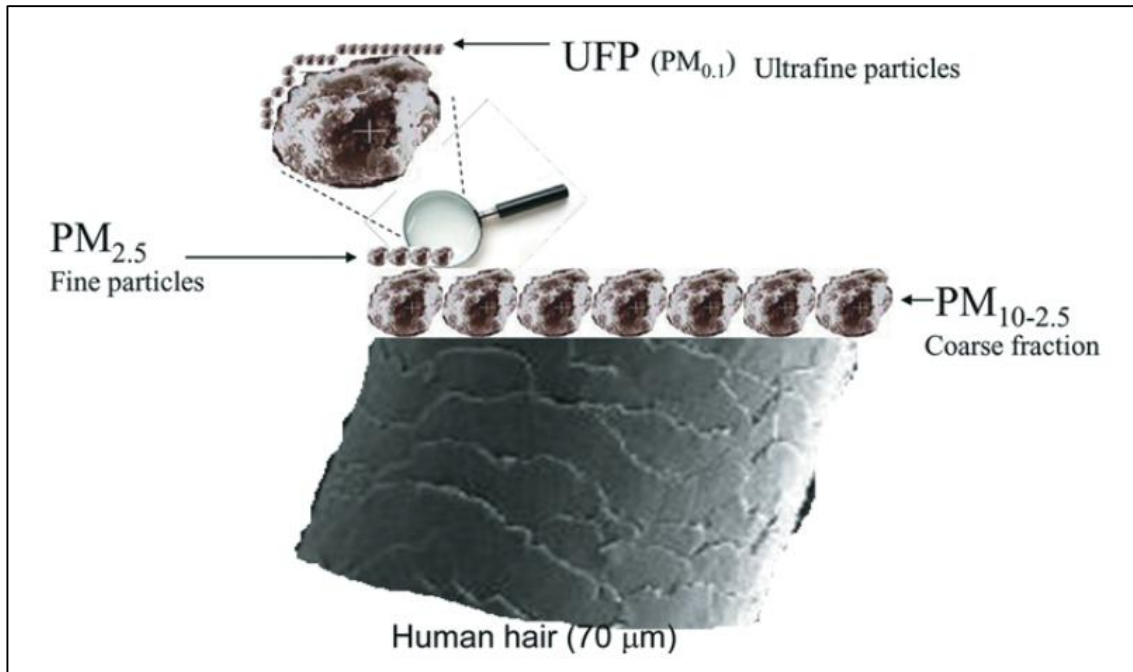


Figura 3.2. Tamaño de las partículas en el aire (Brook, 2008).

3.3. Fuentes emisoras de las partículas

La principal forma de clasificar las fuentes emisoras de partículas es mediante el tipo de fuente.

Las fuentes naturales son aquellas que emiten partículas al aire sin la participación de ninguna actividad humana. Un claro ejemplo sería la expulsión de PM_{2.5} como consecuencia de la explosión de un volcán. Los incendios forestales (fuentes de PM_{2.5}) y la erosión eólica (PM₁₀) como fuentes naturales, son origen de diversidad de opinión ya que se puede entender que un incendio forestal puede haberse causado debido a la acción del hombre o que la erosión eólica se deba a que se utilizan ciertas prácticas de agricultura en esa zona.

Las fuentes antropogénicas son aquellas que incluyen las emisiones generadas por la actividad humana. Algunos ejemplos de fuentes antropogénicas de PM₁₀ los encontramos en el polvo de caminos pavimentados y no pavimentados, en la agricultura, la construcción y la demolición. Algunas de las fuentes de PM_{2.5} son la quema de combustibles fósiles, tubos de escape de vehículos, quema de madera y algunos procesos metalúrgicos.

Es muy difícil diagnosticar cuáles son las fuentes emisoras y con qué cantidad de partículas hacen su aportación a la atmósfera, pero aun así existen muchos métodos que nos facilitan la tarea. Muchos de estos métodos los veremos más adelante.

Varios estudios indican que en España el tráfico es una de las principales fuentes de material particulado. Seguido por la materia mineral proveniente de actividades de construcción/demolición para las PM_{10} (Figura 3.3) y por la combustión de carbón para las $PM_{2,5}$ (Figura 3.4).

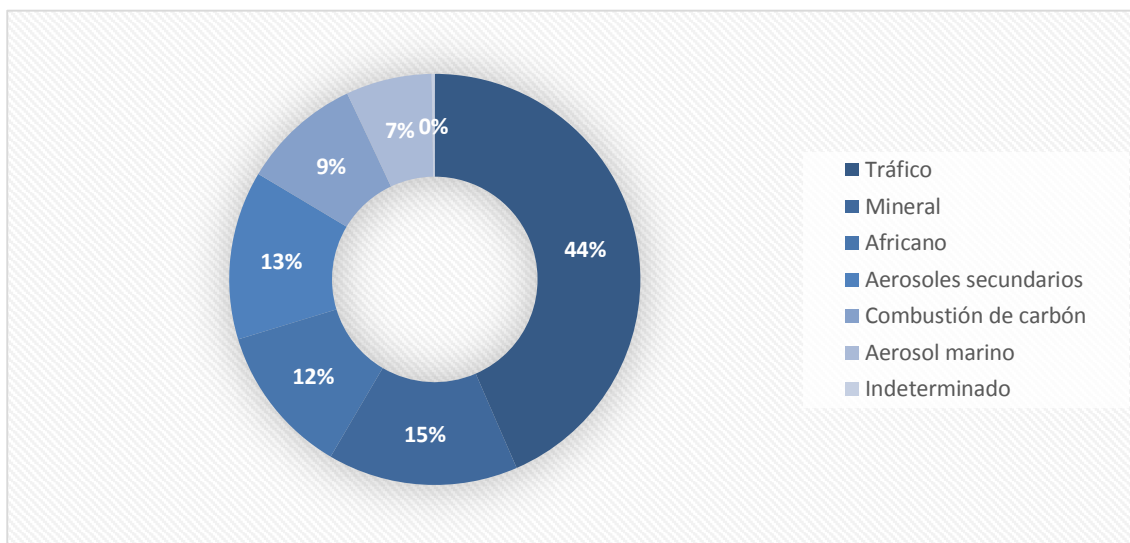


Figura 3.3. Contribución de fuentes de PM_{10} en España (Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC CIEMAT, 2013)

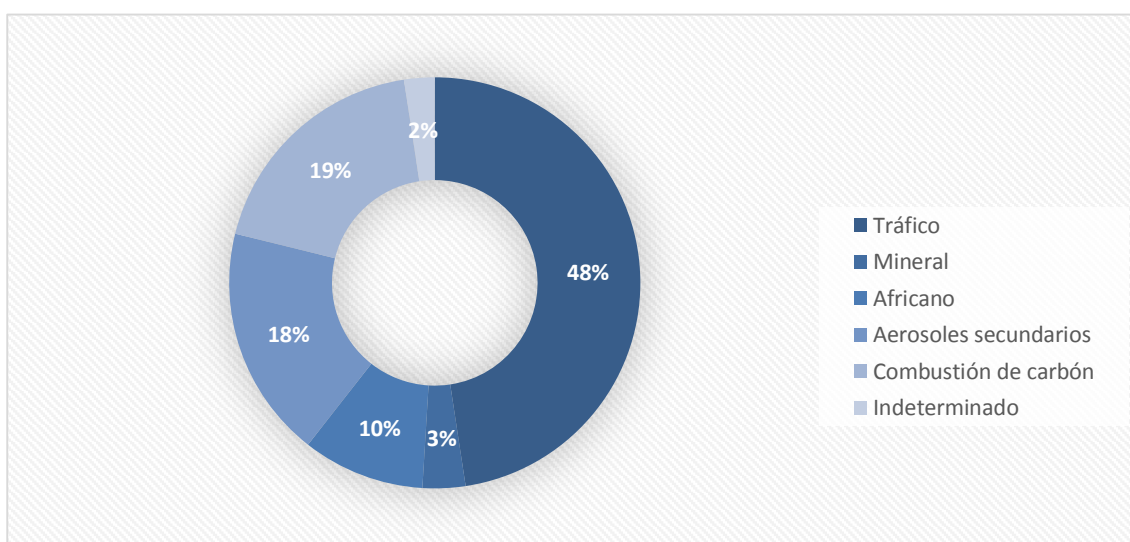


Figura 3.4. Contribución de fuentes de $PM_{2,5}$ en España (Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC CIEMAT, 2013)

4. Comportamiento de las partículas en el aire

Una vez las partículas han sido expulsadas de su fuente de emisión, tienen un cierto período de residencia en la atmósfera.

Las partículas ultrafinas son eliminadas principalmente de la atmósfera por precipitación pluvial. Las partículas finas forman gotas de lluvia en las nubes, por lo que su tiempo de residencia será similar al del agua, 10 días. Las partículas ricas en carbono y las partículas orgánicas son muy difíciles de mojar debido a su hidrofobia, es por eso que primero tienen que oxidar, aumentando así su tiempo de residencia. Todo lo contrario le pasa al dióxido de azufre, ya que al tener la constante de Henry³ muy elevada le resulta muy fácil disolverse en agua (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Por lo general, todas las demás partículas serán eliminadas de la atmósfera mediante el proceso de sedimentación. También es muy importante determinar la distancia que recorrerán estas partículas hasta ser eliminadas. En la Tabla 4.1 quedan resumidas las características principales de la permanencia de las partículas en el aire.

Tabla 4.1. Características sobre la permanencia de las partículas en la atmósfera (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012)

Características	Tipo de partículas		
	Ultrafinas	Finas	Gruesas
Solubilidad	No están bien caracterizadas	Muy solubles	Muy insolubles
Vida media atmosférica	Más de una semana	Entre 2 y 4 días	Minutos a horas
Proceso de eliminación	Eliminación por gotas de lluvia	Sedimentación y eliminación por gotas de lluvia	Sedimentación
Distancia recorrida	De menos de kilómetro a decenas de kilómetros	De cientos a miles de kilómetros	De menos de un kilómetro a decenas de kilómetros (de cientos a miles de kilómetros en tormentas de arena para la fracción de tamaños pequeños)

³ A mayor K_H , mayor solubilidad en agua. K_H (SO_2 , 1atm y 25°C) = $1,2 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{atm}^{-1}$

A continuación se estudia detalladamente el proceso de sedimentación, ya que el método alternativo que se va a desarrollar se fundamenta en éste.

4.1. Sedimentación

La primera fase de las partículas en suspensión es la sedimentación o *settling*. Esta fase queda definida como el proceso que sigue una partícula hasta sedimentarse. Las partículas experimentan una fuerza debido a la gravedad que las hará caer con más o menos velocidad hasta el suelo.

Las partículas con tamaños entre 1 micrómetro y 10 micrómetros suelen formar suspensiones estables en el aire. Cuando su diámetro es inferior a una micra forman suspensiones mecánicamente inestables.

Es durante esta fase cuando las partículas son dañinas y es que al estar aún en el aire pueden ser respiradas. Por lo tanto vamos a estudiar cuánto tiempo tardan en sedimentarse, ya que las partículas que lo hacen con mucha velocidad no entran en nuestro caso de estudio pero en cambio, las que están en el aire durante un determinado tiempo, sí.

Como hemos dicho anteriormente, las partículas consiguen una velocidad constante (la cual será la máxima alcanzable), a esta velocidad se la conoce como velocidad de asentamiento.

Podemos calcular esta velocidad (Ecuación 4.1) desarrollando la Ley de Stokes (de Nevers, 2000).

$$v_s = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d_a \cdot (\rho_{particula} - \rho_{fluido})}{3 \cdot \rho_{fluido} \cdot C_c}} \quad \text{(Ecuación 4.1)}$$

Siendo:

v_s = Velocidad terminal de asentamiento

ρ = densidad

g = Aceleración de la gravedad

C_c = Coeficiente de arrastre

d_a = Diámetro aerodinámico

Por definición, las partículas que están definidas por el diámetro aerodinámico tienen la misma velocidad de sedimentación que una partícula irregular, es por eso que para la Ley de Stokes utilizaremos el diámetro aerodinámico.

Para saber el coeficiente de arrastre C_D debemos saber el número de Reynolds de la partícula ya que depende de éste. A partir de la Figura 4.1 podemos obtener los diferentes coeficientes de arrastre:

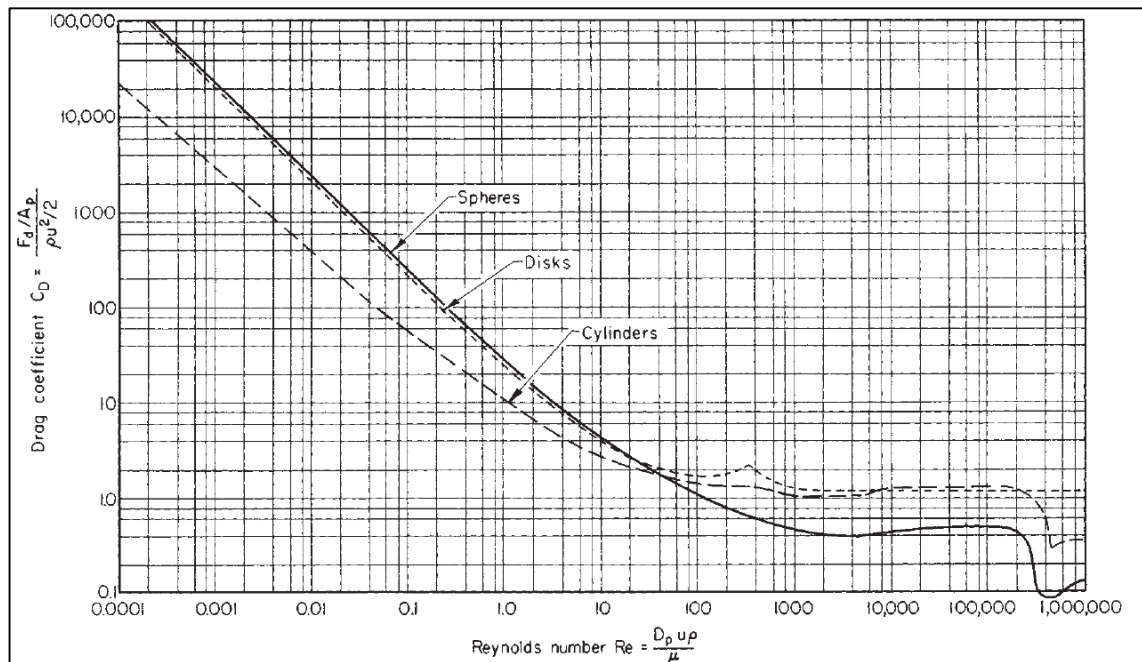


Figura 4.1. Coeficiente de arrastre según número de Reynolds (Sheperd & Lapple, 1939)

Encontramos el número de Reynolds de una partícula mediante la siguiente ecuación:

$$Re_p = \frac{d_a \cdot \rho_{fluido} \cdot u}{\mu} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Siendo:

Re_p = Número de Reynolds de la partícula

u = Velocidad relativa entre el fluido y la partícula

μ = Viscosidad del fluido

Substituyendo en la ecuación de la velocidad de asentamiento el coeficiente de arrastre obtendremos el valor buscado (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Resumen para obtener las diferentes velocidades de asentamiento.

Número de Reynolds	Coeficiente de arrastre	Velocidad de asentamiento
$Re_p < 0,1$	$C_D = \frac{24}{Re_p}$	$v_s = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot (d_a)^2}{18 \cdot \mu}$
$0,1 < Re_p < 1000$	$C_D = \left(\frac{24}{Re_p} \right) \cdot (1 + 0,14 \cdot Re_p^{0,70})$	-
$1000 < Re_p < 35000$	$C_D = 0,445$	$v_s = 1,73 \cdot \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot d_a}{18 \cdot \mu}}$

Es importante mencionar que estas ecuaciones proporcionan el resultado con un cierto error. Cuando los resultados son más fiables son para casos de un número de Reynolds menor a 0,1.

4.2. Impacto inercial

Una vez las partículas encuentran un elemento en medio de su trayectoria, se produce un impacto. Este fenómeno es muy importante ya que nos servirá para poder separar las partículas de un tamaño de las de otro tamaño. Es por ello que averiguar si una partícula impacta contra un objeto o pasa de largo es clave, utilizando para ello el número adimensional de Stokes (Ecuación 4.3).

$$Stk = \frac{\rho_p \cdot C_c \cdot d_a^2 \cdot U}{18 \cdot \mu \cdot d_b} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

Siendo:

C_c = Coeficiente de Cunningham

d_b = Diámetro del obstáculo

U = Velocidad del aire

μ = Viscosidad del aire

A partir del número de Stokes se puede encontrar el diámetro de corte (Ecuación 4.4), que será útil para definir las propiedades del sistema con el fin de que separe las partículas según el tamaño deseado (Baron & Willeke, 2001).

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot W}{\rho_p \cdot U_0 \cdot C_c}} \cdot \sqrt{Stk_{50}} \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

En una situación ideal, el tamaño de corte d_{50} determina que las partículas mayores a ese diámetro impactaran y las menores no. Sin embargo, en la realidad, esta situación es complicada ya que no estamos hablando de un tamiz y hay partículas más grandes que pasarán y partículas más pequeñas que impactarán. Así, para las aplicaciones reales, se utiliza el valor crítico de \sqrt{Stk} , que se suele caracterizar con el subíndice 50. Para encontrar el valor de d_{50} se ha de buscar el punto de contacto entre la curva real y la curva ideal en la Figura 4.2.

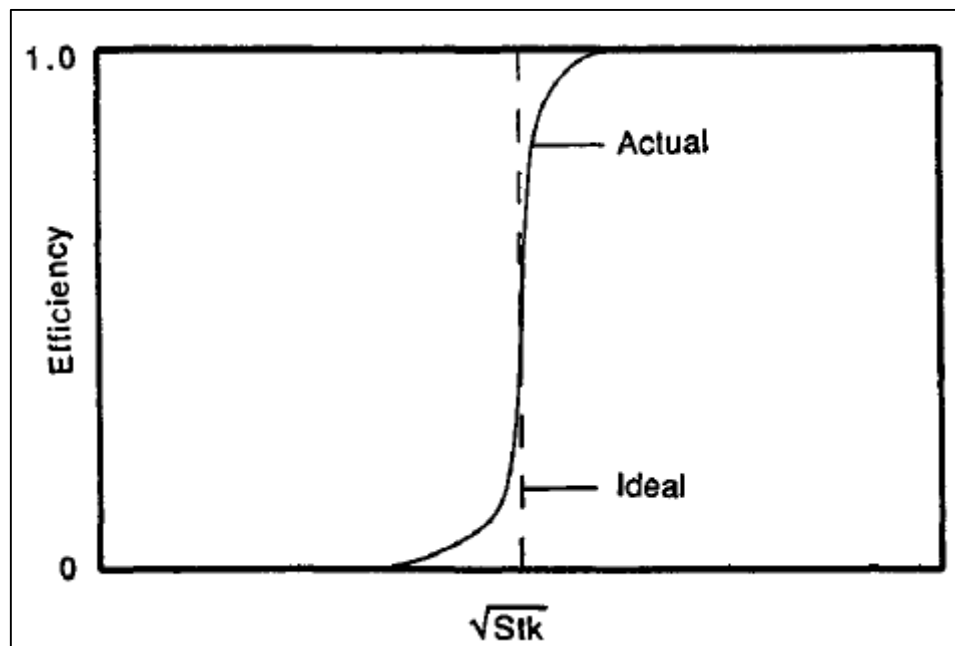


Figura 4.2. Eficiencia ideal y real de impacto en un orificio circular (Baron & Willeke, 2001)

Para orificios circulares el valor de Stk_{50} es de 0,24 y para orificios rectangulares es de 0,59 (University of Florida, Department of Environmental Engineering Sciences, 2013).

Con este valor, y sabiendo que diámetro de partícula queremos separar, se puede diseñar el equipo.

5. Efectos en la salud

Tal vez a comienzos de la segunda mitad del siglo XIX las chimeneas lanzando humo negro y los cielos oscuros por la constante contaminación de las fábricas eran signo de gran prosperidad industrial, pero actualmente se ven como el posible origen de una gran variedad de enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

La existencia de partículas en el aire significa que éstas serán respiradas por cualquiera que se encuentre próximo. Como se ha hablado previamente, existen varias clases de partículas y según éstas, encontramos que afectaran a una zona del cuerpo o a otra.

Las partículas sedimentables no suponen un grave problema para la salud ya que diferentes estudios han demostrado que las partículas superiores a 10 micrómetros son eliminadas por las mucosas nasales y por la garganta y en muy pocas ocasiones llegan a la tráquea o a los bronquios.

Las partículas respirables o PM_{10} , como su nombre indica, son las partículas más grandes que conseguirán superar las barreras nasales y guturales. Una vez estas partículas son respiradas, quedan depositadas en la tráquea y, como mucho, a la región bronquial. Es por esto que a veces a estas partículas se las conoce como la fracción torácica. Esto se traduce en tos, dificultad para respirar e incluso asma⁴.

Aún más peligrosas son las $PM_{2,5}$, ya que éstas pueden viajar a través de las vías respiratorias más pequeñas y llegar hasta la región alveolar. Al ser las partículas tan pequeñas, son atrapadas por células pulmonares, quedándose en el interior del pulmón sin poder ser expulsadas pudiendo provocar enfermedades pulmonares, enfisemas o cánceres pulmonares.

Existe un índice que nos representa la calidad del aire en un lugar y momentos determinados. En Cataluña este índice es conocido como *Índex Català de Qualitat de l'Aire* (ICQA). Calculado a partir de la legislación actual se relacionan todos los contaminantes del aire y se da un valor (relacionado a un color) para facilitar la comprensión de la información. Para calcular el ICQA de cada contaminante utilizaremos la Tabla 5.1.

⁴ Numerosos estudios afirman que existe una clara relación entre la concentración de PM_{10} y la población asmática. Por ejemplo Molina Esquivel (2001).

Tabla 5.1. Índice Catalán de Calidad del Aire (Generalitat de Catalunya, 2005)

ICA	O ₃ (µg/m ³) 1h	PM ₁₀ (µg/m ³) 24h	CO (mg/m ³) 8h	SO ₂ (µg/m ³) 1h	NO ₂ (µg/m ³) 1h
100	0	0	0	0	0
50	110	35	6	200	115
0	180	50	10	350	200
-100	400	350	17	1500	1130
-200	800	420	34	3000	2260
-300	990	500	46	3750	3000
-400	1200	600	58	4900	3750

Para calcular el ICQA global será el valor del contaminante con peor índice (índice más alto). Para hacerlo más visual, se caracterizan mediante colores y estrellas.

Tabla 5.2. Clasificación de la calidad del aire según el Índice Catalán de Calidad del Aire (Generalitat de Catalunya, 2005)

Buena 50 ≤ ICQA ≤ 100	★★★★★	Calidad del aire excelente	75 ≤ ICQA ≤ 100
	★★★★	Calidad del aire satisfactoria	50 ≤ ICQA ≤ 75
Regular 0 ≤ ICQA ≤ 50	★★★	Calidad del aire aceptable	25 ≤ ICQA ≤ 50
	★★	Calidad del aire baja	0 ≤ ICQA ≤ 25
Pobre ICQA < 0	★	Calidad del aire deficiente	-50 ≤ ICQA ≤ 0
	●	Calidad del aire muy deficiente	ICQA < -50

Vale la pena mostrar cómo se calcula este índice en el resto de España, ya que es un poco diferente al modelo catalán.

Tabla 5.3. Índice de Calidad del Aire (Troposfera Soluciones Sostenibles, 2005)

ICA	Calidad del aire	O ₃ (µg/m ³) 1h	PM ₁₀ (µg/m ³) 24h	CO (mg/m ³) 8h	SO ₂ (µg/m ³) 1h	NO ₂ (µg/m ³) 1h
0 - 50	Buena	0 - 90	0 - 50	0 - 5	0 - 175	0 - 100
51 - 100	Admisible	90 - 180	51 - 90	6 - 10	176 - 350	101 - 200
101 - 150	Deficiente	180 - 240	91 - 150	11 - 15	351 - 525	201 - 300
> 150	Mala	> 240	> 150	> 15	> 525	> 301

En España las PM_{2,5} no se tienen en cuenta a la hora de calcular el Índice de Calidad del Aire, aun así, muchas estaciones sí que analizan la concentración de partículas finas.

A continuación se muestran recomendaciones según la calidad del aire con respecto únicamente a las partículas siguiendo el modelo de ICA. Puesto que el estado español no contempla las concentraciones de $PM_{2,5}$ en el ICA (o AQI, Air Quality Index) se ha tomado como referencia a otros países que sí que lo contemplan como China o Canadá.

Tabla 5.4. Efecto de las partículas según ICA en la salud (United States Environmental Protection Agency, 2014)

Valores AQI	Descripción de la calidad del aire	Problemas en la salud	
		PM_{10}	$PM_{2,5}$
0 - 50	Buena	Ninguno	Ninguno
51 - 100	Moderada	Ninguno	Ninguno
101 - 150	Insalubre para grupos sensitivos	Gente con enfermedades respiratorias o del corazón deben limitar esfuerzos prolongados	Personas con enfermedades de las vías respiratorias deben limitar esfuerzos al aire libre
151 - 200	Insalubre	Gente con enfermedades respiratorias o del corazón, los ancianos y los niños deben evitar esforzarse prolongadamente, los demás deben limitar el esfuerzo prolongado	Gente con enfermedades respiratorias como asma, deben evitar esforzarse al aire libre, los demás, especialmente los ancianos y niños deben limitar esforzarse al aire libre prolongadamente
201 - 300	Muy insalubre	Gente con enfermedades respiratorias o del corazón, los ancianos y los niños deben evitar esforzarse prolongadamente, los demás deben limitar el esfuerzo prolongado	Gente con enfermedades respiratorias como asma, deben evitar esforzarse al aire libre, los demás, especialmente los ancianos y niños deben limitar esforzarse al aire libre prolongadamente
> 301	Peligroso	Todos deben evitar cualquier esfuerzo al aire libre. Gente con enfermedades del corazón o respiratorias deben permanecer en casa	Todos deben evitar cualquier esfuerzo al aire libre. Gente con enfermedades respiratorias como asma, deben permanecer en casa

Para calcular el *Air Quality Index* necesitamos saber la concentración del contaminante que se desea estudiar. A continuación se buscará en la Tabla 5.5 en que rango se encuentra y anotaremos sus BP (*BreakPoints*) superior e inferior y sus AQI superior e inferior. Por ejemplo si la concentración de PM_{10} es igual a $60 \mu g/m^3$, El BP_{inf} y BP_{sup} serán respectivamente 55 y 154. Y el AQI_{sup} y AQI_{inf} serán respectivamente 51 y 100. Una vez conocidos estos datos podemos tener el valor del AQI.

$$AQI = \frac{AQI_{sup} - AQI_{inf}}{BP_{sup} - BP_{inf}} \cdot (Concentración - BP_{inf}) + AQI_{inf} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

Tabla 5.5. BreakPoints (BP) para PM_{10} y $PM_{2,5}$ (World Air Quality, 2014)

AQI	$BP_{PM_{10}} (\mu g/m^3, 24h)$	$BP_{PM_{2,5}} (\mu g/m^3, 24h)$
0 - 50	0 - 54	0 - 12,0
51 - 100	55 - 154	12,1 - 35,4
101 - 150	155 - 254	35,5 - 55,4
151 - 200	255 - 354	55,5 - 150,4
201 - 300	355 - 424	150,5 - 250,4
301-400	425 - 504	250,5 - 350,4
401-500	505 - 604	350,5 - 500

Como en España no se llegan a valores más altos que 200, no se tiene una recomendación oficial de qué hacer en caso de que la concentración de partículas suba de estos límites y es por eso que se relativiza asumiendo que para un ICA mayor de 150 la calidad del aire es *mala*.

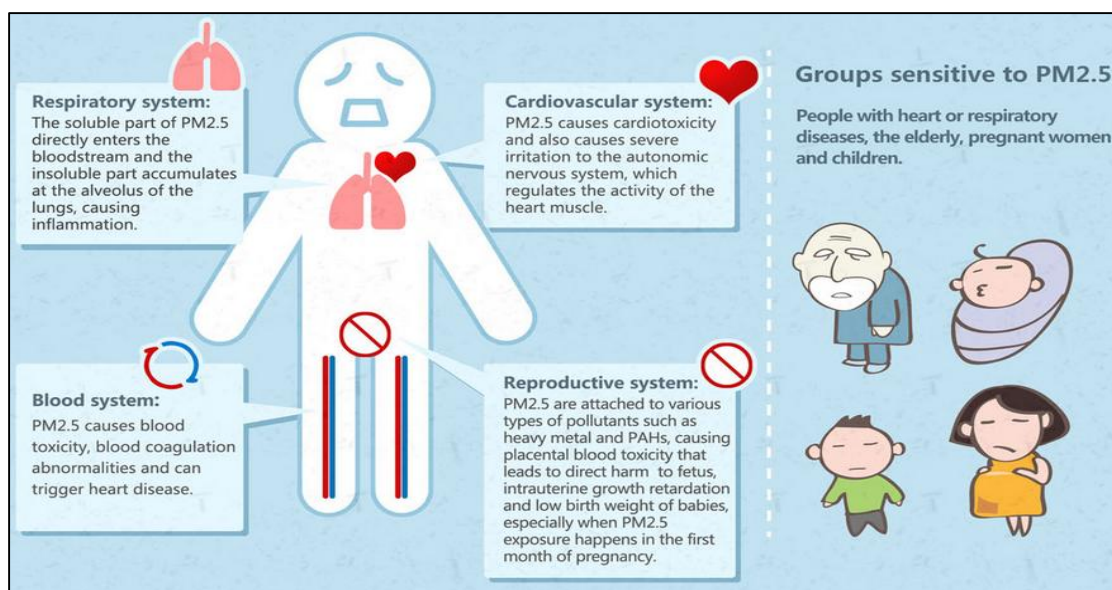


Figura 5.1. Efectos en la salud de las personas al respirar $PM_{2,5}$ (World Air Quality, 2014)

6. Efectos en el medioambiente

Los materiales en suspensión no solamente tienen efectos nocivos sobre los seres vivos sino que también causan importantes sucesos en el medioambiente.

Actualmente se sabe que las partículas en el aire pueden ser una de las causas del cambio climático. Nos podemos encontrar con dos casos distintos. Algunas partículas, como sulfatos que contienen algunos aerosoles, hacen que la luz solar sea dispersada al impactar contra estos y enviada de vuelta al espacio, enfriando de esta manera la atmósfera terrestre. Por otro lado podemos encontrar partículas como el caso del carbón negro que, al posarse sobre la nieve o el hielo marino acumula fácilmente el calor, impidiendo que la luz sea reflejada. Así pues, se aceleraría el deshielo de los casquetes polares.

Es importante explicar uno de los sucesos registrados más importantes de la historia y cómo se vio el planeta afectado. En 1815, el volcán Tambora (Indonesia) entró en erupción, expulsando a la atmósfera entre 10 y 120 millones de toneladas⁵ de azufre. Ese mismo año se observó que en muchas zonas del hemisferio norte se había formado una niebla extraña, a la cual se la definió como *velo de aerosoles de sulfato estratosféricos* (Oppenheimer, 2003). Las temperaturas medias globales disminuyeron significativamente causando grandes problemas en la agricultura que luego se vieron reflejados en la peor hambruna europea del siglo XIX (Oppenheimer, 2003).

Otro importante efecto que causan las partículas en suspensión es la reducción de visibilidad. Las partículas no dejan pasar la luz solar para que llegue al ojo reduciéndose así el campo visual. Una visibilidad pobre puede tener un impacto negativo tanto en la calidad de vida de las personas que viven en ese lugar como de un problema de cara al turismo en las ciudades, como por ejemplo Pekín.

Nos encontramos también con problemas como el daño a ciertos materiales y edificios. Igual que el primer ejemplo, el carbón negro puede manchar edificios e incluso llegar a dañar fachadas. Cabe remarcar su importancia a la hora de mantener monumentos, estatuas y diferentes elementos históricos que necesitan un cuidado especial.

⁵ Los resultados varían dependiendo del método utilizado.

7. Legislación y normativa

Normalmente se necesita más de una ley para regular un contaminante. Este es el caso de las partículas en suspensión, las cuales se regulan directamente con instrumentos legales europeos y convenios internacionales. Aunque España sigue la normativa Europea, algunos precursores de las PM se regulan con otras medidas legales.

7.1. Europea

DIRECTIVA 2008/50/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.

- Unificación de la mayor parte de la legislación existente en una sola directiva sin ningún cambio en los objetivos de calidad del aire existentes.
- Nuevos objetivos para las $PM_{2,5}$, incluyendo las concentraciones máximas permitidas y los objetivos de reducción.
- La posibilidad de no contar las fuentes naturales como causas de contaminantes a la hora de cumplir los valores límites.
- La posibilidad de extender hasta tres años el tiempo para cumplir los valores límites de las PM_{10} .

7.2. Internacional

Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia).

- Firmado por primera vez en Génova en 1979.
- A fecha de 2011, ha sido ratificada por 51 países.
- Desarrollado en 8 protocolos a través de los que se muestran medidas para reducir la contaminación aérea. El protocolo que hace referencia a las PM se le conoce por Protocolo de Gothenburg.
- Su principal objetivo es limitar superiormente la concentración de los diferentes contaminantes y reducirlos gradualmente.
- Se están tratando nuevos temas, entre ellos la problemática de las $PM_{2,5}$.

7.3. Normativa

Las especificaciones concretas y detalladas de los procesos de medida de partículas contaminantes aparecen en las siguientes normas europeas:

- La norma UNE-EN 12341:1999 detalla el método de referencia para determinar la fracción de PM_{10} de la materia particulada en suspensión.
- La norma UNE-EN 14907:2006 detalla el método gravimétrico de referencia para la determinación de la fracción másica de $PM_{2,5}$ de la materia particulada en suspensión.

8. Medición de la calidad del aire

Las normas en relación a los procesos de referencia para la determinación de las fracciones másicas de las partículas son de acceso restringido. Esto debe estar presente en el siguiente apartado, ya que en su lugar se ha utilizado información obtenida en el artículo de Fernández Patier (2009).

A la hora de medir contaminantes hay que tener en cuenta dos conceptos: emisión e inmisión. La medición de contaminantes en emisión se mide justo en la fuente de salida, en cambio la medición de contaminantes en inmisión es la medida de estos a nivel de suelo.

Encontramos dos métodos de medición diferentes. Los métodos discontinuos y los métodos continuos. Los métodos discontinuos se basan en una captación de la muestra y después transportada ésta a un laboratorio para obtener los resultados. En cambio, los métodos continuos analizan los resultados *in situ*, pudiendo saber los valores a cada instante. Es por ello que es mucho más útil un método continuo, ya que el método discontinuo nos daría un valor medio, en el cual no podríamos apreciar picos ni variaciones en un rango de tiempo específico. Por el contrario, una medición continua requiere una inversión mucho mayor.

Una vez se sabe con qué precisión se quiere medir el contaminante (y si se tienen los recursos para ello), nos preguntamos de qué manera vamos a hacerlo. El primer paso será determinar el método de captación de las partículas y el segundo qué método de análisis se va a utilizar.

8.1. Métodos de captación de referencia

Los métodos de captación se dividen básicamente en dos aspectos: la colección de la muestra sobre algún tipo de filtro mediante una bomba que succiona el aire ambiente y un equipo que distribuye los diferentes tamaños de las partículas.

Los equipos de referencia utilizados son los captadores de alto volumen (HVS) y los captadores de bajo volumen (LVS). El principal distribuidor de partículas es el impactador. Los captadores de referencia que veremos a continuación están hechos solamente para obtener una medida de partículas. Si se quiere que un mismo instrumento separe varios tamaños se utilizará un impactador en cascada.

8.1.1. Captador de referencia para PM₁₀

Según la UNE-EN 12341:1999 hay un método de referencia para captar las partículas torácicas. Que sea de alto volumen implicará un caudal de aspiración de 68 m³/h. A continuación se detalla el captador (Figura 8.1) y el modo de uso:

- Se aspira el aire a través de la apertura superior.
- En el cabezal el aire se acelera a través de nueve boquillas impactantes (1) dirigiéndose así hacia la superficie de impacto.
- El flujo de aire se dirige por dieciséis tubos (2) a través de un tamiz al portafiltro.

El captador de bajo volumen implicará un caudal de aspiración de 2,3 m³/h. A continuación se detalla el captador (Figura 8.2) y el modo de uso:

- Se aspira el aire a través de la abertura circunferencial entre el armazón y la tapa redonda montada encima.
- En el cabezal el aire se acelera a través de ocho boquillas impactantes (1) dirigiéndose así hacia la superficie de impacto.
- El flujo de aire se dirige por un tubo (2) al portafiltro.

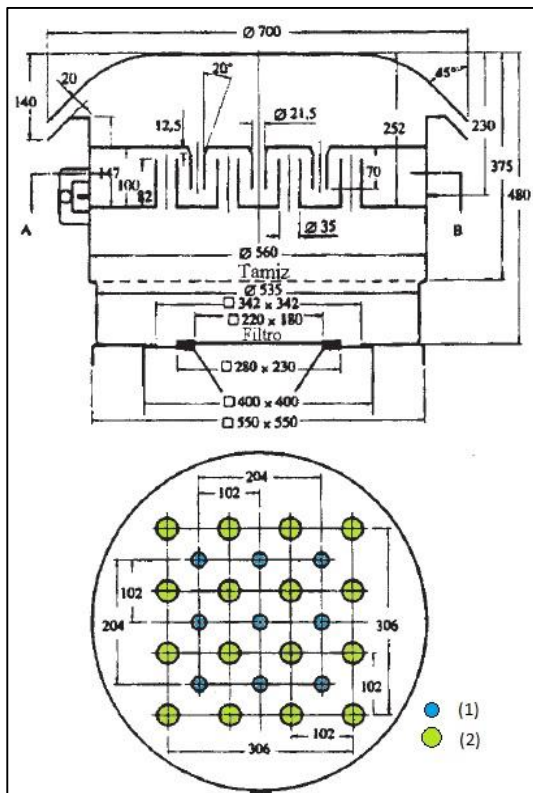


Figura 8.1. Diseño del captador de PM₁₀ de alto volumen, dimensiones en milímetros (Fernández Patier, 2009)

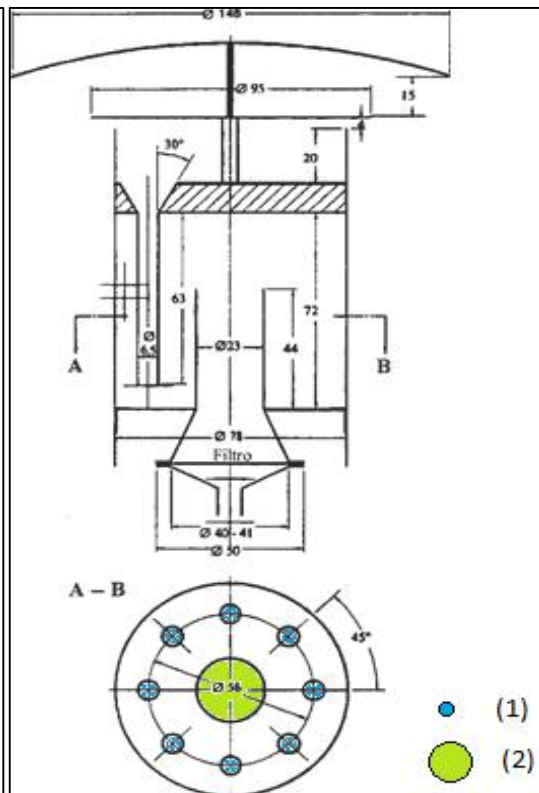


Figura 8.2. Diseño del captador de PM₁₀ de bajo volumen, dimensiones en milímetros (Fernández Patier, 2009)

8.1.2. Captador de referencia para PM_{2,5}

Según la UNE-EN 14907:2006 se establece la necesidad de realizar mediciones de partículas respirables en los mismos puntos donde se miden las partículas torácicas. Por ello, en dicha norma se citan dos captadores de referencia.

El captador de referencia de bajo volumen (LVS PM_{2,5}) utiliza un caudal de aspiración de 2,3 m³/h siguiendo un funcionamiento similar al del cabezal de referencia de bajo volumen de las PM₁₀. El captador de referencia de alto volumen (HVS PM_{2,5}) utiliza un caudal de aspiración de 30 m³/h siguiendo un funcionamiento similar al del cabezal de referencia de alto volumen de las PM₁₀.

La Figura 8.3 muestra una estación típica de captador de partículas de alto volumen completa.

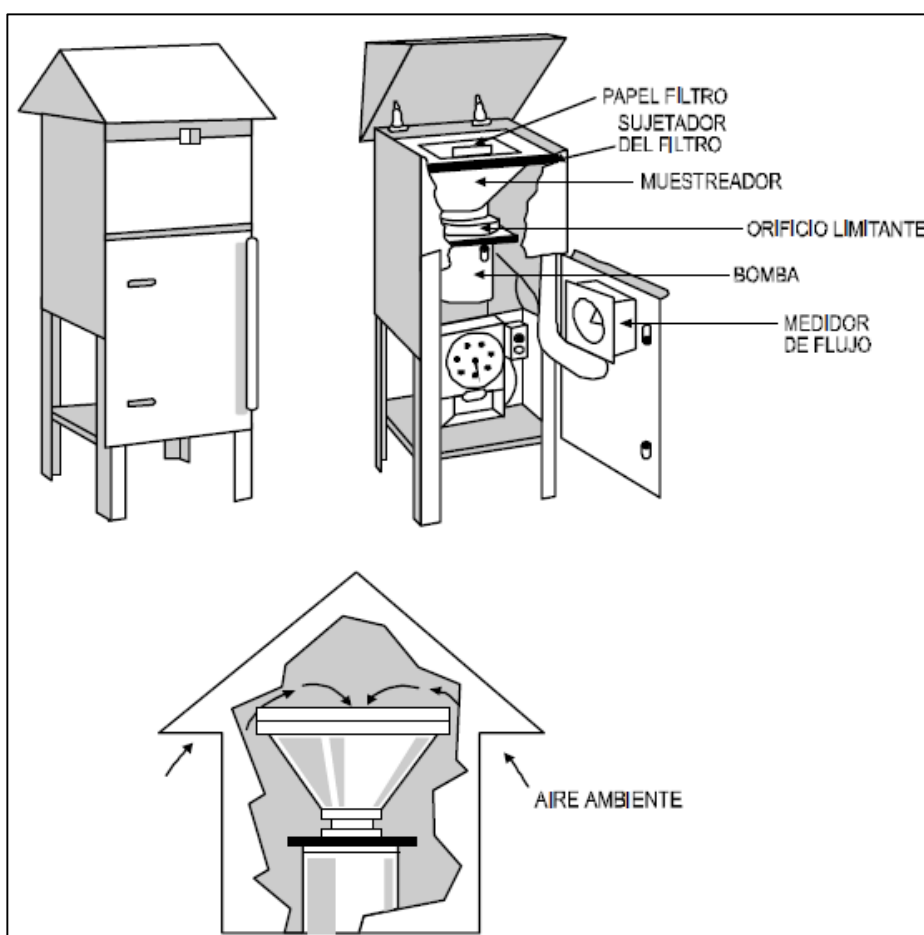


Figura 8.3. Ejemplo completo de captador de partículas de alto volumen (Fernández Patier, 2009)

8.2. Métodos de análisis discontinuos. El método gravimétrico.

El método de referencia en el análisis discontinuo es el gravimétrico. Esta técnica consiste en calcular la masa del filtro sin partículas a una temperatura y humedad determinadas. A continuación se coloca en el instrumento de captación y se suele dejar 24h. Tras ese día se lleva el filtro a un laboratorio y al cabo de un determinado tiempo se vuelve a pesar calculando la concentración mediante la diferencia de masas entre la muestra y el blanco, utilizando el volumen de aire total que ha pasado a través del filtro.

La norma UNE-EN 12341:1999 para PM_{10} indica una resolución mínima para la balanza de 0,00001g y que los filtros han de estar después de la captación durante 48h en una sala a una temperatura de $20^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ y humedad relativa de $50\% \pm 5\%$.

La norma UNE-EN 14907:2006 para $PM_{2,5}$ indica una resolución igual o mejor de 10mg para filtros utilizados en el sistema de bajo volumen y de una resolución igual o mayor de 100mg para filtros utilizados en el sistema de alto volumen.

8.3. Métodos de análisis continuos de referencia

Independientemente del método que utilicemos, para analizar un tipo u otro de partículas, añadiremos al equipo un cabezal determinado. Así pues, si queremos determinar las partículas torácicas añadiremos un cabezal PM_{10} y, si queremos determinar las partículas respirables, añadiremos un cabezal $PM_{2,5}$.

Los cabezales suelen utilizar separadores de haz tubular, haciendo que las partículas mayores del diámetro que queremos queden retenidas en un lecho de silicona.

A veces encontramos cabezales más sofisticados, que son capaces de separar a la vez diferentes tamaños de partículas (captadores de polen y de etapas múltiples).

8.3.1. Atenuación de radiación β

Este es el método continuo de referencia. Su funcionamiento se basa en la utilización de una bomba de absorción para aspirar el aire a través del equipo depositando las partículas en un filtro. A continuación se aplica sobre el filtro radiación beta de bajo nivel haciendo que las partículas que hay en el filtro absorban la radiación y entonces el equipo mide esta radiación absorbida. Como fuente radiactiva suele utilizarse el carbono-14. A

estos monitores se les suele conocer con el nombre de BAM (*Beta-Particle Attenuation Monitor*). La Figura 8.4 detalla el proceso.

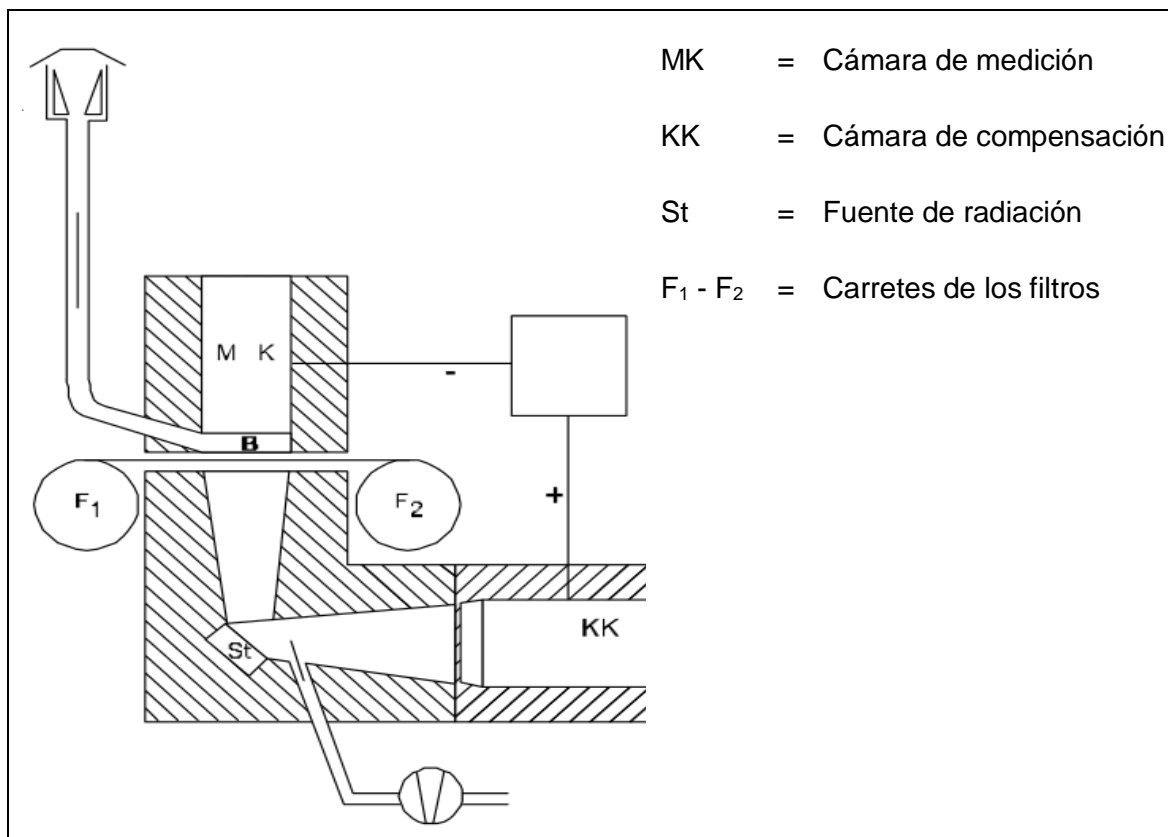


Figura 8.4. Esquema de un Beta-Particle Attenuation Monitor (Martínez & Romien, 1997)

Mediante la (Ecuación 8.1) empírica se puede obtener la masa total de partículas:

$$N = N_0 \cdot e^{-km} \quad (\text{Ecuación 8.1})$$

Siendo:

N = Número de electrones transmitidos por unidad de tiempo medidos después del filtro

k = Coeficiente de absorción por unidad de masa

N₀ = Número de electrones incidentes por unidad de tiempo

m = Masa por área de materia que absorbe la radiación beta

8.3.2. Transductor de elemento oscilante

Este método se basa en la frecuencia con la que oscila el elemento que sustenta el filtro. El aire va pasando a través del filtro, dejando sobre éste las partículas (Figura 8.5). A medida que avanza el tiempo, las partículas se acumulan sobre éste haciendo que aumente su masa. Cuanto mayor sea la masa, menor será la frecuencia con la que oscila. Mediante una relación frecuencia de oscilación - masa de partícula y teniendo en cuenta el volumen de aire se calculará la concentración de partículas.

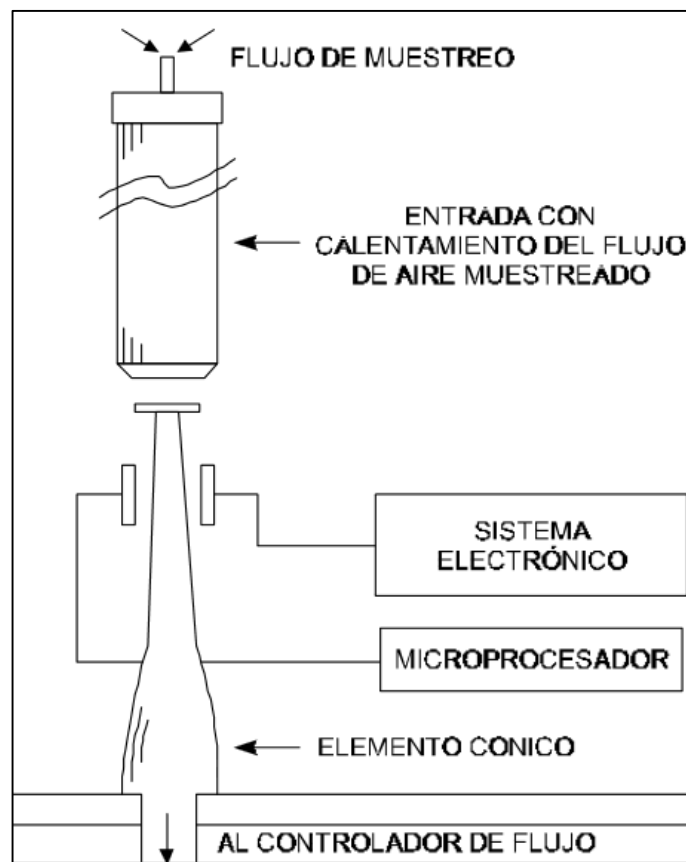


Figura 8.5. Esquema de un transductor de elemento oscilante (Martínez & Romien, 1997)

9. Alternativa propuesta

Debido a que el sistema actual de medición de partículas en el aire es extremadamente caro (aproximadamente 125000€), se ha puesto como objetivo de este proyecto encontrar una alternativa que sea mucho más económica y suficientemente eficiente para obtener unos resultados cuasi infalibles. El fin del proyecto no es obtener un instrumento que sustituya a los actuales sino un instrumento que se pueda utilizar en lugares con pocos recursos y que sirva para dar un valor aproximado de cuál es la calidad del aire en cualquier momento.

El principio para captar las partículas va a ser similar al utilizado actualmente. El cambio se va a realizar en el método de análisis. Se ha optado por buscar un método también continuo para obtener los valores en un rango de tiempo mínimo. También se ha buscado un método que no genere ningún tipo de residuo de difícil reciclaje para reducir aún más su coste.

Dividiremos el instrumento en cada una de las diferentes partes que lo componen explicándolas detalladamente.

9.1. Sistema actual

El proyecto se basa en buscar una alternativa a la instrumentación actual más utilizada. Uno de los instrumentos más vendidos del mercado para el análisis de partículas en continuo es el Analizador Continuo de Partículas en Suspensión MP101M de la compañía francesa Environnement S.A.

Este sistema es capaz de analizar de manera continua y simultánea PM_{10} mediante la tecnología de la atenuación beta (8.3.1) utilizando una fuente de carbono-14.

Además, se le ha añadido una técnica para obtener la concentración de las partículas más pequeñas mediante de la dispersión dinámica de luz. Esta técnica consiste en hacer impactar la luz de un láser sobre las partículas haciendo que ésta se disperse en todas las direcciones. Entonces se registra la intensidad de los impulsos cuando la luz cruza las partículas. El sistema distingue las partículas según la intensidad de la señal. Para PM_{10} la señal es fuerte, para $PM_{2,5}$ la señal es intermedia y para PM_1 la señal es débil. Esta tecnología se denomina CPM (Monitoreo Continuo de Partículas).

Utilizando simultáneamente estas dos técnicas y aplicando un potente algoritmo es capaz de detectar las diferentes concentraciones de partículas con una fiabilidad perfecta.

9.2. Alternativa para el captador: El impactador en cascada

Al tener la necesidad de que una misma estación calcule tanto partículas torácicas como partículas finas se puede utilizar un impactador en cascada (Figura 9.1). Mediante el método de impacto directo se pueden separar varios rangos de tamaños de partículas.

El impactador en cascada sigue la física explicada en el apartado 4.2, en este caso concreto interesa tener cuatro fases o *stages* (Figura 9.2):

- Fase 1: Las partículas con un diámetro superior a 10 micrómetros impactaran contra el primer obstáculo pasando únicamente las partículas con un diámetro inferior a éste.
- Fase 2: Llegan todas las partículas menores a 10 micrómetros, impactando sobre el segundo obstáculo todas las partículas mayores a 2,5 micrómetros. Por lo tanto en el esta fase nos encontramos con el rango de partículas entre 2,5 micrómetros y 10 micrómetros. Las partículas gruesas.
- Fase 3: Llegan todas las partículas menores a 2,5 micrómetros, impactando sobre el tercer obstáculo todas las partículas mayores al diámetro que se elija como límite que será capaz de detectar el instrumento de análisis (por ejemplo 1 micrómetro). Aquí queda recogida las partículas finas.
- Última fase: Las partículas menores al tamaño decidido como límite se recogen en la última fase mediante un filtro.

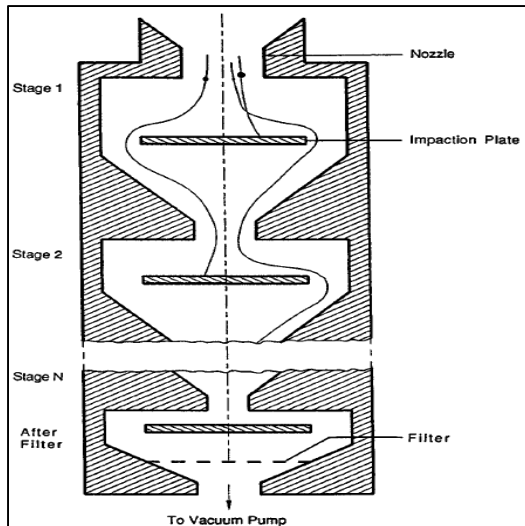


Figura 9.1. Esquema de un impactador en cascada (Baron & Willeke, 2001)

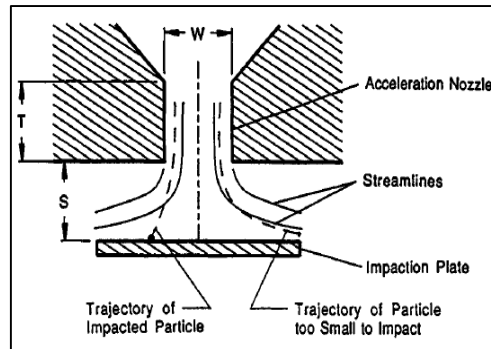


Figura 9.2. Esquema de una fase en un impactador en cascada (Baron & Willeke, 2001)

Para diseñar el impactador de cascada, primero es necesario saber las condiciones de uso. Se consideran condiciones de aire estándar, así pues se tienen las siguientes propiedades:

Tabla 9.1. Condiciones del aire

Temperatura (°C)	25
Presión (Pa)	10^5
Densidad (kg/m ³)	1,168
Viscosidad dinámica (Pa·s)	$1,848 \cdot 10^{-5}$
Caudal (m ³ /s)	$6,388 \cdot 10^{-4}$

Para diseñar un impactador en cascada se necesita saber cuántas etapas habrá y cuántos orificios (N), su forma (circular o cuadrada) y su diámetro (W) o lado (L) respectivamente.

El impactador que se va a diseñar tendrá 3 etapas más la etapa del filtro. La forma de los orificios será circular. Una vez se han decidido estas condiciones iniciales, se empieza por la primera etapa, la cual seguirá los siguientes pasos (Marple & Willeke, 1976).

1. Elegir un diámetro de corte deseado.

$$d_{50} = 10 \mu\text{m}$$

(Ecuación 9.1)

2. Utilizando la Figura 9.3, determinar a partir del caudal de diseño y del diámetro de corte deseado el valor del diámetro y el número de los orificios.

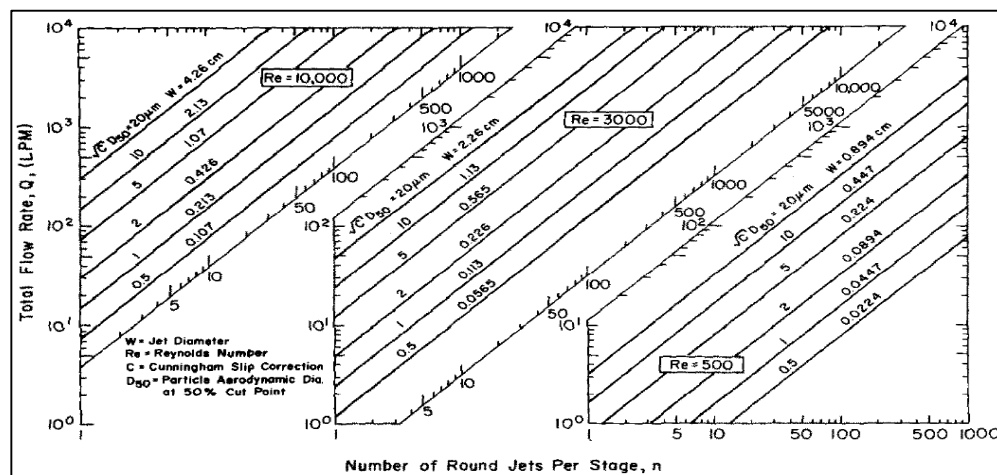


Figura 9.3. Esquema para diseño de impactadores de orificio circular (Marple & Willeke, 1976)

$$W = 1,13 \text{ cm} ; N = 2 \text{ orificios}$$

(Ecuación 9.2)

3. Calcular el número de Reynolds desarrollando la (Ecuación 4.2 para comprobar que estamos en el rango adecuado (500-3000)).

$$Re = \frac{4 \cdot \rho_a \cdot Q}{\pi \cdot N \cdot \mu \cdot W} = 2275 \rightarrow \text{Rango correcto} \quad (\text{Ecuación 9.3})$$

4. Calcular el número de Stokes. Si nos encontramos en el rango de Reynolds de entre 500 y 3000, Stk_{50} tiene un valor de 0,24. Si nos encontramos fuera del rango se puede calcular mediante la Figura 9.4.

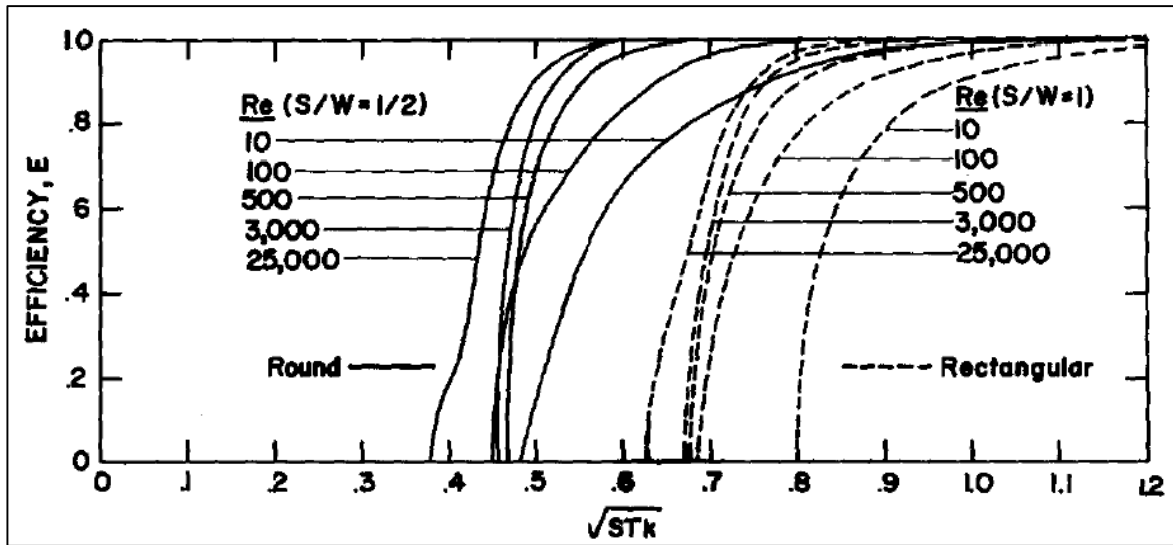


Figura 9.4. Curvas teóricas de la eficiencia de un impactador para orificios circulares y cuadrados

5. Determinar la presión en la zona de impacto siendo P_1 la presión de entrada al orificio (en este caso, 10000Pa).

$$P_2 = P_1 - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot W^2} \right)^2 \rightarrow P_2 = 99976,3 \text{ Pa} \quad (\text{Ecuación 9.4})$$

6. Calcular el factor de corrección de Cunningham.

$$C_C = 1 + \frac{0,163}{d_a \cdot P_2} + \frac{0,0549}{d_a \cdot P_2} \cdot e^{(-6,66 \cdot d_a \cdot P_2)} \rightarrow C_C = 1,16 \quad (\text{Ecuación 9.5})$$

7. Calcular el diámetro de corte real.

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9 \cdot Stk_{50} \cdot \pi \cdot N \cdot \mu \cdot W^3}{4 \cdot \rho_p \cdot Q \cdot C_C}} \rightarrow d_{50} = 10,9 \mu\text{m} \quad (\text{Ecuación 9.6})$$

8. Como se puede observar, el diámetro de corte no es exactamente de 10 micrómetros, por lo que si queremos mayor precisión a la hora de captar partículas es necesario un cambio. Mediante una hoja de cálculo se irán probando diferentes diámetros reales y/o número de orificios intentando que se cumpla Reynolds. A continuación se resolverá el sistema en el orden siguiente (Ecuación 9.4), (Ecuación 9.5), (Ecuación 9.6) hasta encontrar una solución válida. Para este caso:

$$W = 1,07 \text{ cm} ; N = 2 \rightarrow Re = 2402 \rightarrow P_2 = 99971 \text{ Pa} \rightarrow C_C = 1,16 \rightarrow d_{50} = 10,03 \mu\text{m}$$

9. Una vez determinados los diámetros de los orificios, hay que determinar la profundidad de los estos (T) y la distancia desde la salida hasta el plato de impacto (S) tal y como se puede observar en la Figura 9.2. El criterio para calcular S (Baron & Willeke, 2001) se muestra en la (Ecuación 9.7).

$$\begin{aligned} \frac{S}{W} &= 1,0 \text{ (impactadores circulares)} \\ \frac{S}{W} &= 1,5 \text{ (impactadores rectangulares)} \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 9.7)}$$

10. Para calcular T es necesario que los orificios tengan la profundidad suficiente para estabilizar el aire. Por lo que siempre que la entrada sea cónica (Baron & Willeke, 2001) como en el ejemplo de la Figura 9.2, cumpliendo la (Ecuación 9.8) será suficiente.

$$\frac{T}{W} \geq 1,0 \quad \text{(Ecuación 9.8)}$$

11. Por último, se sugiere (Baron & Willeke, 2001) que se haga un modelo de simulación para encontrar las medidas más adecuadas para S y T. Por eso, mediante el complemento FlowSimulation de SolidWorks se han obtenido los resultados definitivos⁶ (Tabla 9.2). La Figura 9.5 muestra la simulación de las partículas en la primera etapa. Las bolas rojas representan partículas mayores de 10 μm (en este caso 12 μm) y las bolas azules representan partículas menores de 10 μm (en este caso 8 μm). En una foto estática es difícil de apreciar pero en movimiento se observa como las partículas que van hacia el interior acaban siendo arrastradas hacia la siguiente etapa.

⁶ Estos resultados son aproximados debido a que no se disponen de todas las opciones de este complemento de SolidWorks por su alto coste.

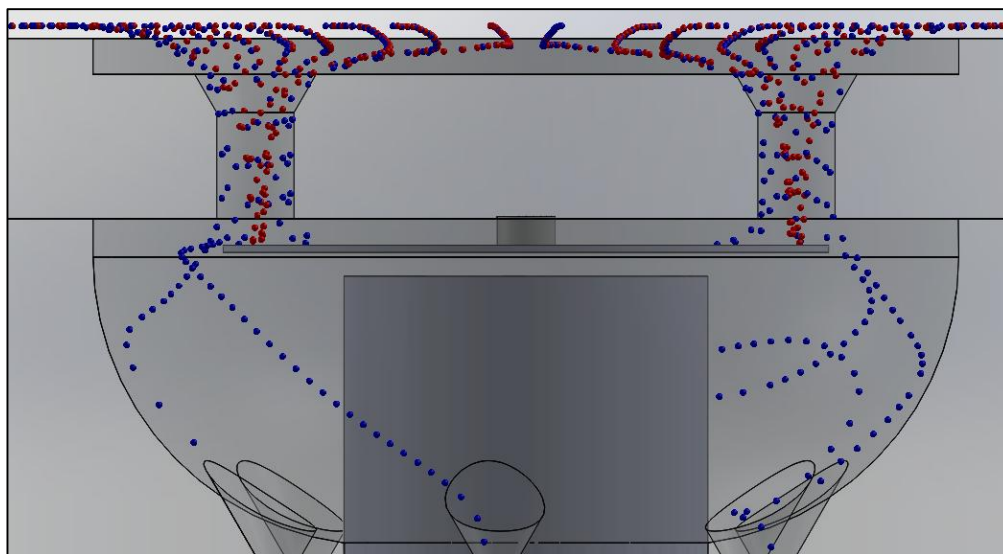


Figura 9.5. Simulación de la primera etapa del impactador realizada con FlowSimulation (SolidWorks)

Tabla 9.2. Parámetros para el diseño de las distintas fases del impactador en cascada

Etapas	Corte supuesto (μm)	d_{50} (μm)	N	W (mm)	S (mm)	T (mm)	Re	ΔP (Pa)
1	10,0	10,03	2	10,70	3,70	14,70	2402	29
2	2,5	2,56	6	3,40	5,00	3,61	2596	2892
3	1,0	1,01	33	1,60	5,00	2,60	974	58966
Filtro		0						

El mejor material para construir el impactador será utilizar aluminio, gracias a su baja densidad y facilidad de manufactura. Utilizando las herramientas que nos proporciona SolidWorks, la superficie total de las piezas de aluminio es de $0,3 \text{ m}^2$. Es muy importante que el aluminio sea de alta calidad, sobre todo para las etapas de impacto ya que el diámetro de los orificios es muy pequeño y se necesitará un buen fresado y unas brocas extremadamente finas.

Para los platos de impacto de las tres primeras etapas se utilizará una cinta aluminio (35mm de ancho por 30m de largo) enrollada a un rodillo con una teórica autonomía de hasta 3 años. Para la última etapa se instalará un filtro de fibra de vidrio para captar todas las partículas menores a 1 micrómetro. Las fases del impactador se unirán con tornillos de fijación para poder separar las fases siempre que queramos. Entre las fases se pondrá teflón para sellar las posibles fugas.

En el Anexo B se muestran los planos del impactador con todo detalle.

9.3. Alternativa para el análisis: El microscópico óptico de exploración

Una vez se han separado las partículas por tamaños, hay que obtener la concentración de partículas que se han quedado en la segunda y tercera etapa. Para ello se va a utilizar un sistema de conteo de partículas, así pues, primero de todo necesitaremos una herramienta que nos ayude a poder ver las partículas con suficiente precisión. Sabíamos que un microscopio óptico tiene un rango de aumentos de hasta 500x aproximadamente, pero para comprobar que era suficiente se hicieron diferentes pruebas con un microscopio óptico⁷. Para ello se utilizaron muestras de serrín menores a 40 micrómetros, pudiéndolas observar sin ningún tipo de problemas con solamente 5 aumentos.

Para observar las PM_{10} y las $PM_{2,5}$ utilizaremos un microscopio con 200x ya que será suficiente para apreciar las partículas sobre un fondo homogéneo. Si quisiéramos apreciar con detalle las partículas 200x serían insuficientes, pero como la función es contar cuántas hay, su utilización es válida.

Se ha elegido como candidato un Microscopio MAC-500 Mini 5MP Handheld Portable Digital Microscope de la empresa china Gain Express. Este microscopio óptico ha sido elegido debido a sus pequeñas dimensiones (50,5mm de diámetro x 45mm de largo, ya que es necesario que quepa dentro del impactador en cascada) y a sus 200 aumentos.

A continuación se muestran otras características del microscopio útiles para el proyecto:

- Resolución en pantalla de 1280x720 píxeles
- Campo de visión a 200 aumentos de 1,9 x 1,5 mm
- Distancia mínima de trabajo a 17mm
- Conexión por USB

⁷ El microscopio utilizado pertenece al departamento de Ingeniería Química de la ETSEIB (Barcelona) y es un microscopio de luz polarizada de Zeiss modelo Axioscop 40 Pol. Y la cámara digital es una Zeiss AxiosCam MRC5.

9.4. Programación en MATLAB

Una vez listo el montaje de los microscopios dentro del impactador un programa diseñado específicamente para este proyecto se encargará de contar las partículas que impactan tanto en la fase de las PM_{10} como en la fase de las $PM_{2,5}$.

Para realizar las distintas pruebas y comprobar que el programa funciona correctamente se ha utilizado como hardware de imagen una Logitech HD Pro Webcam C920 y como imagen de partículas, muestras de partículas de serrín tomadas en el laboratorio.

El orden de acciones en el instrumento y comandos que se van a ir ejecutando en el Software es el siguiente suponiendo un tiempo entre análisis de 30 minutos.

1. Se abre el programa y aparece la ventana Inicio (Figura 9.6). Aquí se tiene que señalar qué microscopio va a trabajar en la etapa de las PM_{10} , cuál en la etapa de las $PM_{2,5}$ y con qué formato trabajarán. También se introducirán los valores de caudal y de tiempo entre un análisis y otro. Por último se hará clic en el botón SIGUIENTE.

The screenshot shows a MATLAB window titled 'Inicio'. It contains the following fields:

- Seleccione Microscopio PM10:** A dropdown menu with options 'gige', 'matrox', and 'winvideo'.
- Nombre Microscopio PM10:** A text box containing 'Logitech HD Pro Webcam C920'.
- Seleccione Formato Microscopio PM10:** A dropdown menu with options 'I420_1024x576', 'I420_1280x720', and 'I420_1600x896'.
- Seleccione Microscopio PM2,5:** A dropdown menu with options 'gige', 'matrox', and 'winvideo'.
- Nombre Microscopio PM2,5:** A text box containing 'Logitech HD Pro Webcam C920'.
- Seleccione Formato Microscopio PM2,5:** A dropdown menu with options 'I420_1024x576', 'I420_1280x720', and 'I420_1600x896'.
- Caudal de Aspiración (m3/min):** A text box containing '0.01'.
- Tiempo entre Análisis (min):** A text box containing '30'.
- SIGUIENTE:** A button at the bottom center.

Figura 9.6. Ventana Inicio del programa

2. Aparecerá en pantalla la interfaz del programa (Figura 9.7). Cuando hagamos clic en el botón START el sistema empezará a funcionar. El aire entrará por el tejado del impactador y las partículas de entre 10 y 2,5 micrómetros impactarán en la fase de las PM_{10} y las partículas entre 2,5 y 1 micrómetro impactarán en la fase de $PM_{2,5}$.

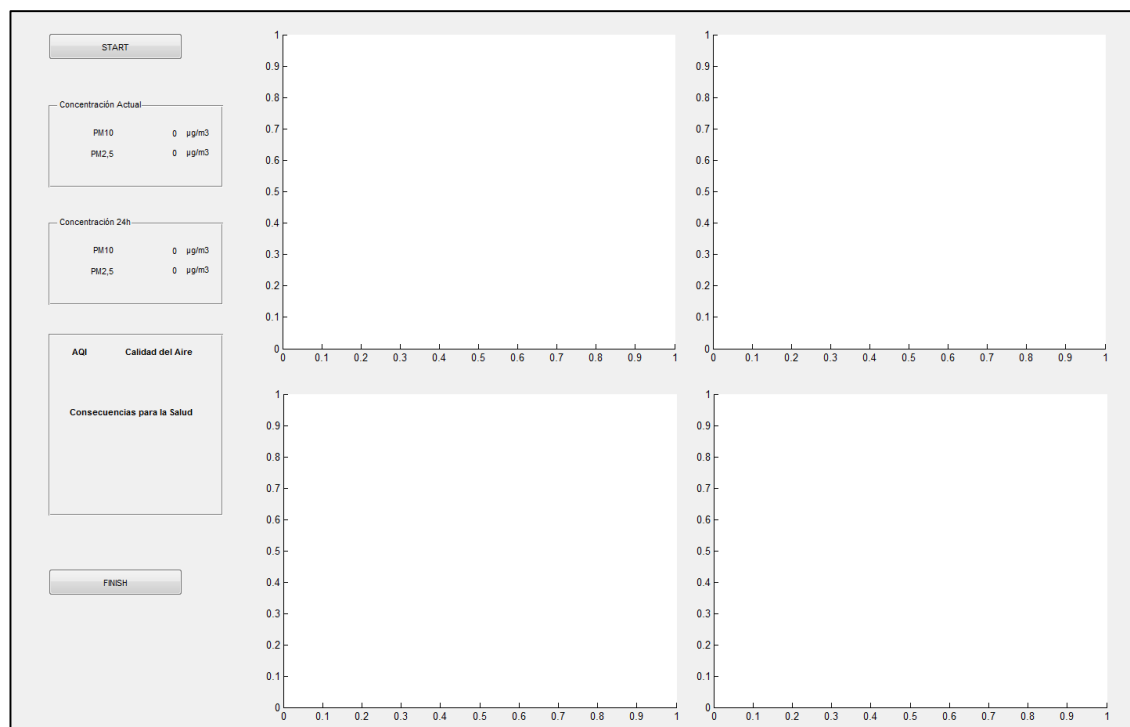


Figura 9.7. Interfaz del programa Calcula Partículas

3. Una vez han pasado 30 minutos, los dos rodillos giran enviando a la zona del microscopio todas las partículas recolectadas y dejando la zona de impacto limpia.
4. En cuanto la zona con las partículas se ha puesto al alcance del microscopio, éste lanza diez fotos a la cinta mientras esta va avanzando, cogiendo así diferentes muestras para obtener una media.
5. Automáticamente, mediante un algoritmo (Anexo A), el programa calcula el total de partículas que aparece en cada foto y hace la media de las diez para tener así un valor estadístico aceptable. En la Figura 9.8 y en la Figura 9.9 se pueden ver los pasos que sigue el algoritmo para calcular las partículas. Tras hacer un análisis de las imágenes selecciona el conjunto de píxeles juntos superior a un cierto tamaño y elimina los sobrantes, calculando así el número real de partículas, evitando contar también elementos indeseables.

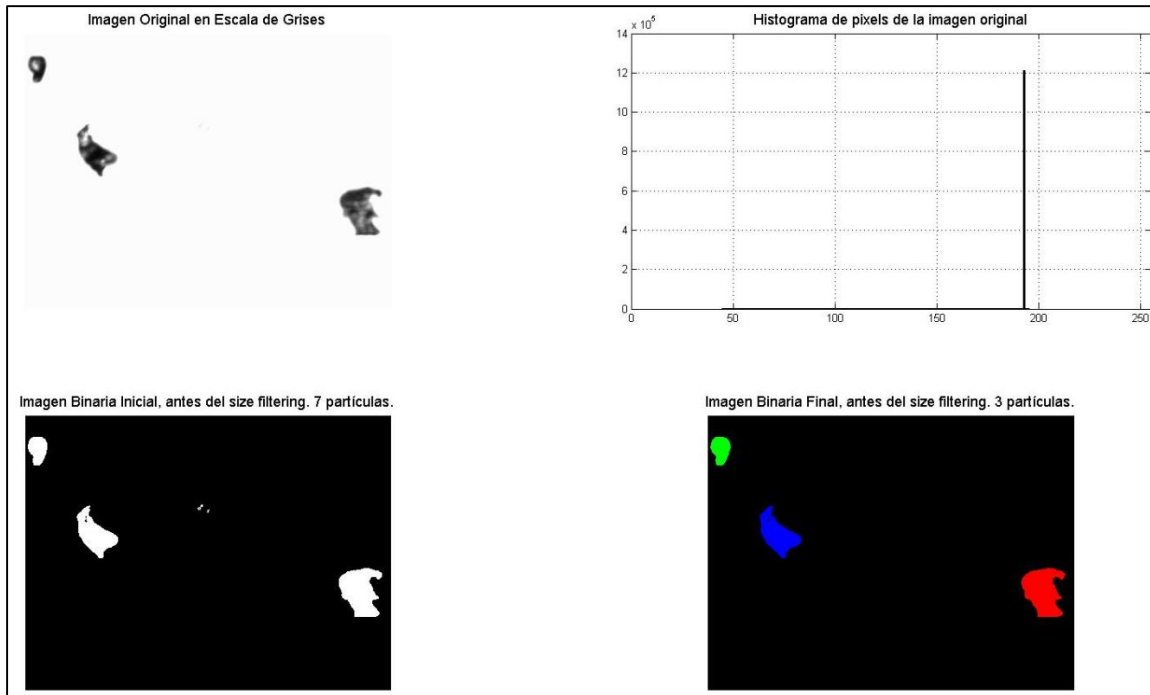


Figura 9.8. Ejemplo del conteo de partículas

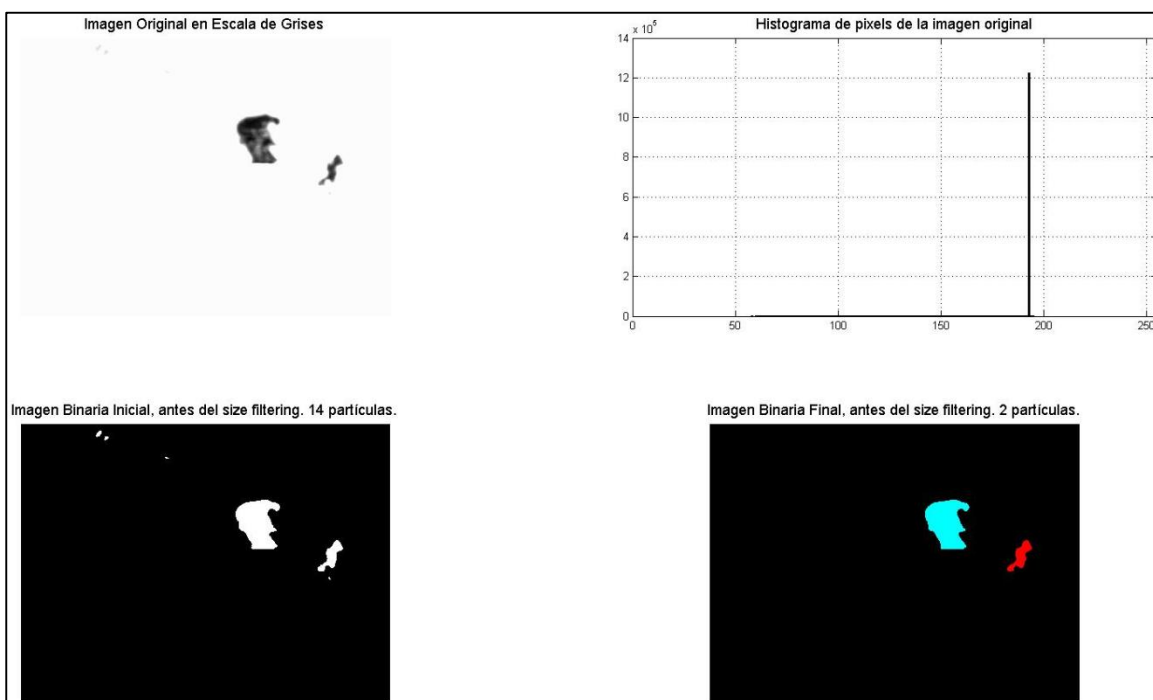


Figura 9.9. Ejemplo del conteo de partículas

6. A partir del número total de partículas recolectadas durante media hora y el caudal de aire (controlado por un caudalímetro) el programa calculará automáticamente la concentración de partículas en el aire de esa media hora utilizando la (Ecuación 9.9).

$$C_{PM} = \frac{NP \cdot V \cdot \rho_p}{Q \cdot t} \quad (\text{Ecuación 9.9})$$

Siendo:

C_{PM}	=	Concentración de partículas	ρ_p	=	Densidad de las partículas
NP	=	Número de partículas	t	=	Tiempo transcurrido (h)
V	=	Volumen de las partículas	Q	=	Caudal de aspiración (m ³ /h)

Es importante recordar que se considera que todas las partículas tenían densidad de 1000kg/m³ y que como el impactador capta por el diámetro aerodinámico se puede considerar que las partículas son esféricas a la hora de calcular el volumen.

7. Al valor tomado cada media hora se le llamará valor actual y aparecerá en pantalla (Figura 9.10) de dos formas distintas: En el cuadro Concentración Actual aparecerá la última concentración calculada tanto de PM₁₀ como de PM_{2,5} y en los gráficos de la izquierda veremos la evolución de las diez últimas concentraciones calculadas (es decir, si se ha configurado cada media hora, veremos la evolución de las últimas cinco horas).

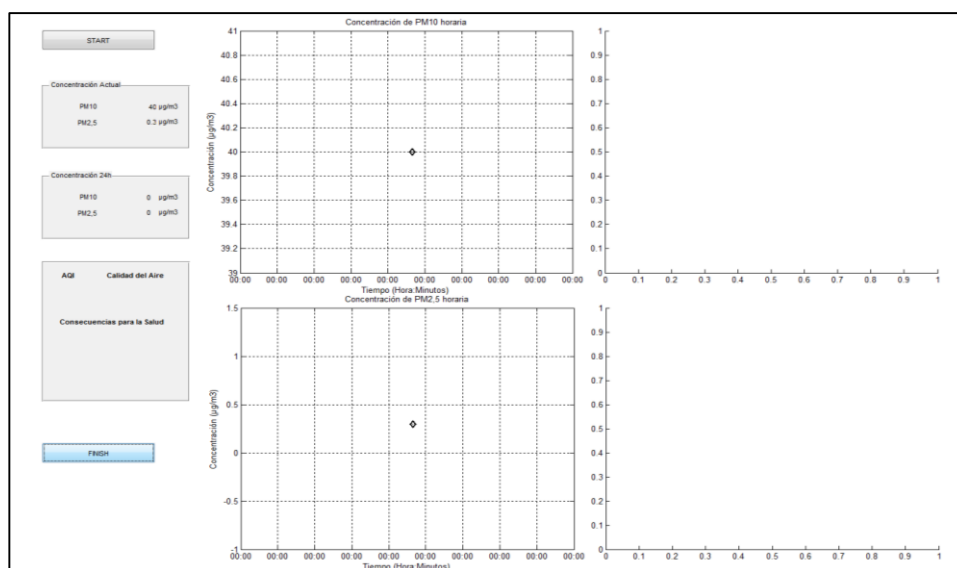


Figura 9.10. Interfaz del programa con los primeros valores

8. Este proceso se repite cada media hora (o cada tiempo que el usuario decida elegir en el inicio). En cuanto han pasado 24 horas se hace una media de todos los valores encontrados y se marcan en los dos gráficos de la parte inferior mostrando la concentración diaria. A partir de este punto se repetirá el proceso constantemente.

Tanto en la Figura 9.11 como en la Figura 9.12 se muestra un ejemplo simulando un cálculo de concentración de partículas cada 10 minutos. En los gráficos de la izquierda se observa la evolución de la concentración de partículas en el aire, de las últimas dos horas y en los gráficos de la derecha se observa la evolución de los últimos diez días. La Figura 9.11 nos indica que el último día registrado ha tenido un Índice de Calidad del Aire de 44 con sus respectivas explicaciones. La Figura 9.12 nos indica que el último día registrado ha tenido un Índice de Calidad del Aire de 52 también con las pertinentes explicaciones de seguridad.

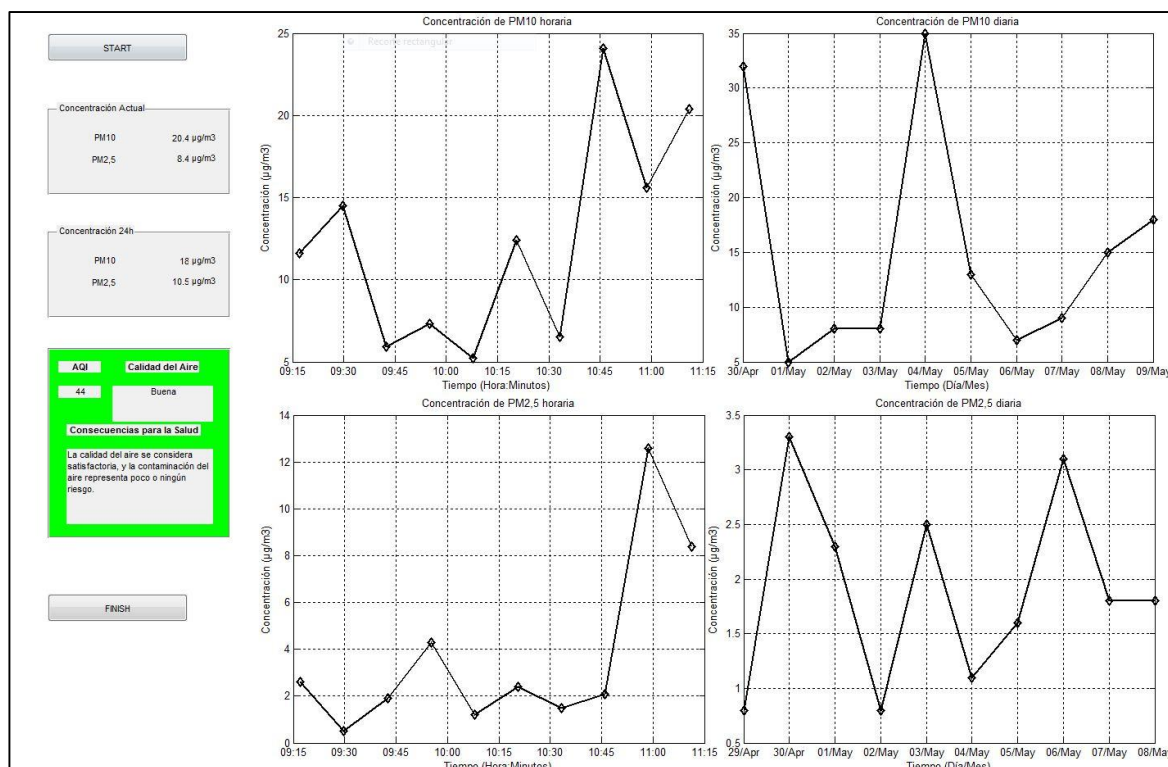


Figura 9.11. Pantalla de resultados obtenidos tras la ejecución del programa diseñado, con el detalle en verde de una buena⁸ calidad del aire.

⁸ Por calidad buena se entiende que su índice de calidad del aire está comprendido entre 0 y 50. No conlleva ninguna clase de problemas de salud. Para más detalles sobre las diferentes variables de calidad del aire consultar la Tabla 5.4.

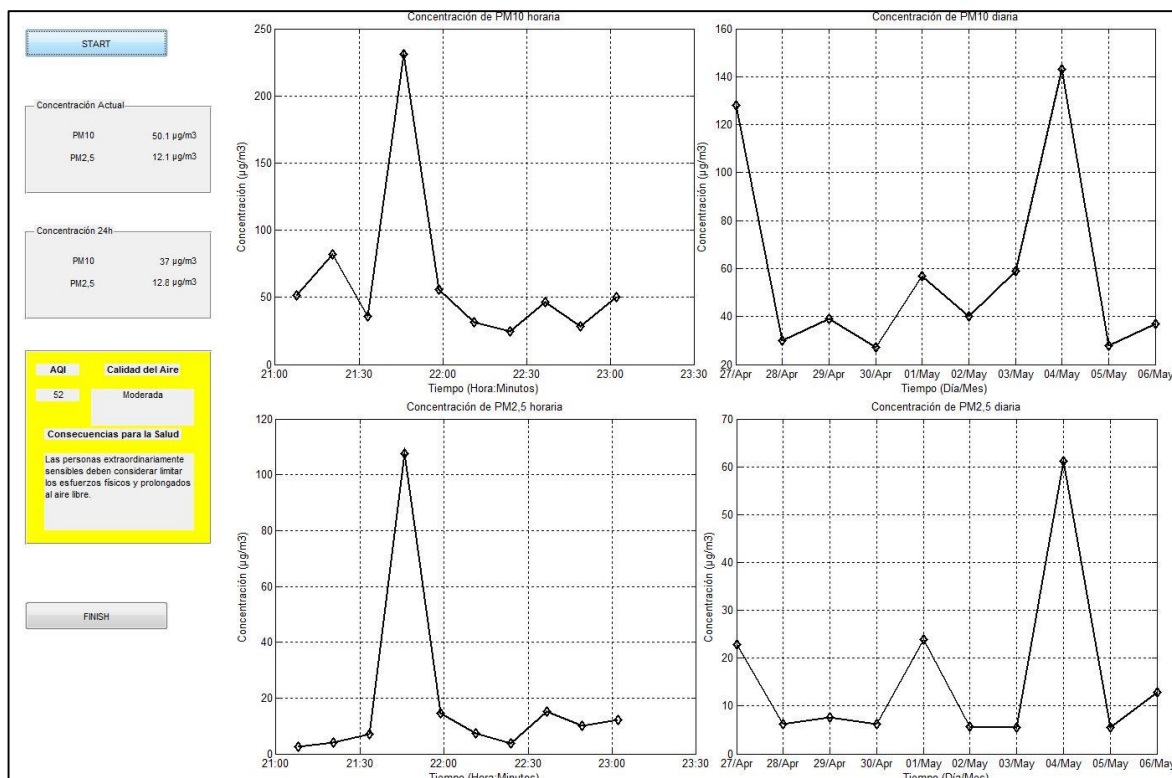


Figura 9.12. Pantalla de resultados obtenidos tras la ejecución del programa diseñado, con el detalle en amarillo de una moderada⁹ calidad del aire.

El programa analizará las partículas del aire hasta que el usuario haga clic en el botón FINISH. Una vez clicado, se parará todo el sistema de fotografía y análisis. Para volver a empezar solamente será necesario clicar, como se ha hecho anteriormente, el botón START.

⁹ Por calidad moderada se entiende que su índice de calidad del aire está comprendido entre 51 y 100. No conlleva ninguna clase de problemas de salud. Para más detalles sobre las diferentes variables de calidad del aire consultar la Tabla 5.4.

9.5. Montaje definitivo

Una vez está claro el diseño del conjunto del impactador hemos de añadir los demás elementos que harán funcionar el equipo entero (Figura 9.13).

El principal elemento es la bomba de vacío, que será la encargada de absorber el aire que pasa a través del impactador. Para ello se utilizará la Bomba rotativa a paletas RE 9 de la compañía IFI (Instrumentos Físicos Ibérica S.L.) que nos aportará un caudal de aproximadamente $4\text{m}^3/\text{h}$.

Justo al final del impactador encontramos el caudalímetro que se utilizará para medir el caudal de aire que pasa a través del impactador. Para ello se utilizará un Anemómetro de tubo de Pitot PVM-620 de la compañía PCE Ibérica S.L.

Seguido del caudalímetro se instalarán dos manómetros con sus respectivas válvulas de seguridad.

Paralelamente a los elementos anteriores una válvula bypass será la encargada de conseguir el caudal que necesita el sistema. Si queremos, por ejemplo, que el sistema trabaje a $2,3\text{m}^3/\text{h}$ éste será el valor que deberá leer el caudalímetro. Si el caudalímetro lee un valor diferente, una electroválvula modificará su apertura hasta conseguir que el caudalímetro tenga el valor deseado.

Las uniones de las tuberías son de una pulgada, por lo que para unir todo el sistema se utilizarán 3 metros de tuberías de goma para vacío de una pulgada.

Todos estos instrumentos irán conectados a un ordenador, en el que se leerán y ejecutarán las diferentes órdenes.

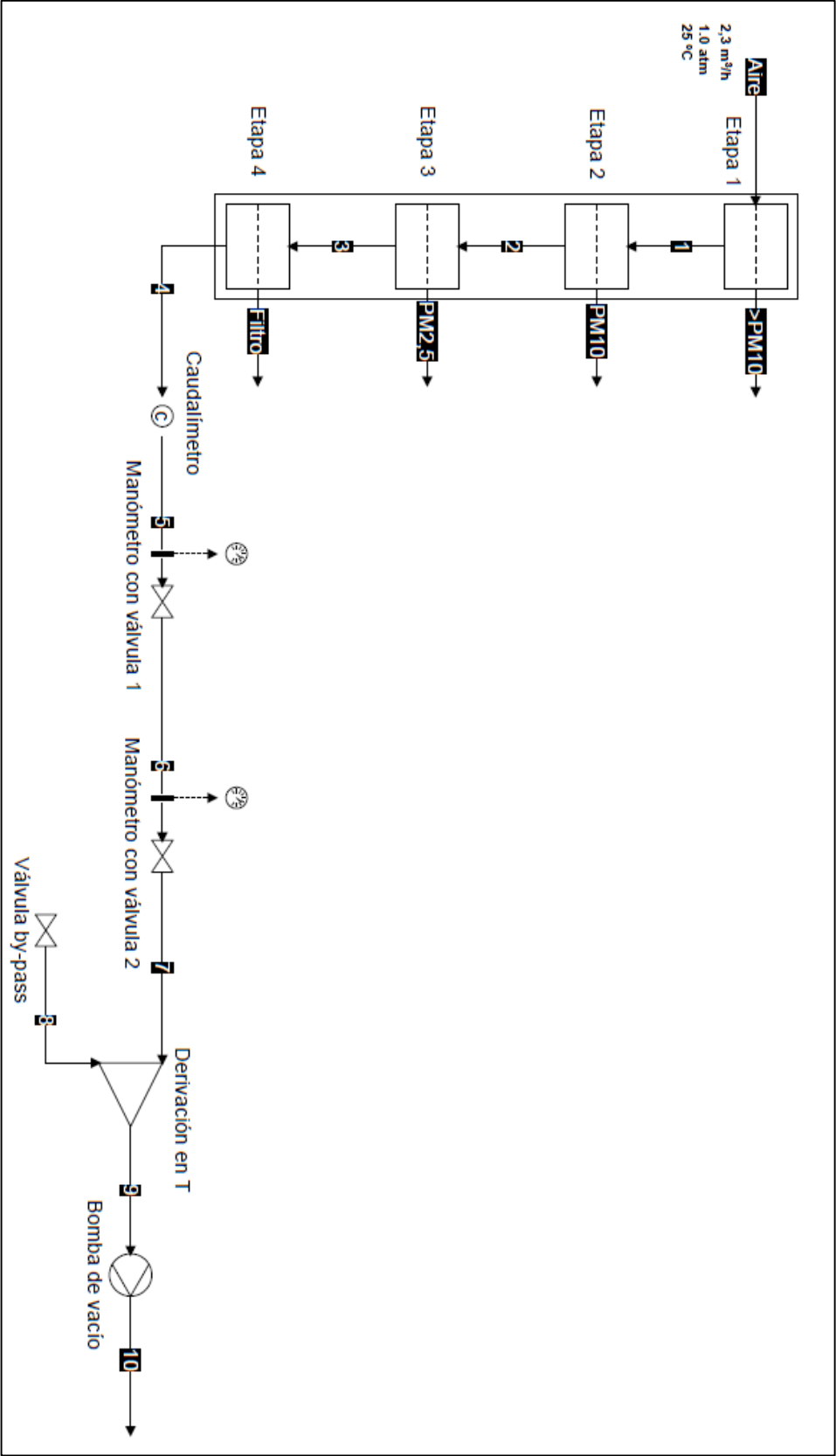


Figura 9.13. Esquema del sistema completo

9.6. Otras alternativas

En el transcurso del proyecto, surgen alternativas que merecen ser estudiadas para ver si realmente son mejores que la original, y conocer qué aportes podría implementar en la propuesta primera. A continuación, se presenta una comparación multicriterio de las posibles alternativas, la valoración de la cual surge fruto de la comparativa realizada con la alternativa original presentada como la más eficiencia. Estas alternativas serán puntuadas del 0-10, según los criterios presentados.

- Utilización de un ciclón¹⁰ para la separación de las partículas en lugar del impactador en cascada con el mismo método de conteo de partículas.
 - Ventajas: Mayor eficiencia a la hora de separar las partículas.
 - Inconvenientes: Es necesario un ciclón por cada etapa de separación que necesitemos (para este proyecto serían necesarios cuatro ciclones), elevando así el precio final del producto.
- Utilización de balanzas electrónicas como método de cálculo para la concentración de las partículas a partir de la masa de partículas medidas y manteniendo el impactador en cascada.
 - Ventajas: Bajo coste para las dos básculas necesarias.
 - Inconvenientes: La eficiencia será muy baja debido a la dificultad de tarar las balanzas con precisión cada corto periodo de tiempo.
- Utilización del método gravimétrico discontinuo pero contratando personal 24 horas todos los días del año para que esté analizando las muestras cada el tiempo que sea necesario obteniendo así un análisis continuo.
 - Ventajas: El método gravímetro en discontinuo es muy eficiente. Por lo tanto si hay personal para poder analizar continuamente las muestras se mantendría la alta eficiencia.
 - Inconvenientes: Alto coste para mantener trabajadores las 24h del día en todas las estaciones de análisis de aire.

¹⁰ Un ciclón es un equipo de recolección de polvo en el cual “el gas cargado de polvo penetra tangencialmente en una cámara cilíndrica o cónica, en uno o más puntos, y sale de la misma a través de una abertura central. En virtud de su inercia, las partículas de polvo tienden a desplazarse hacia la pared exterior del separador, desde la cual son conducidas a un receptor” (Perry, 2001).

Tras analizar los puntos fuertes y débiles de las diferentes alternativas, la Tabla 9.3 las evalúa según distintos criterios.

Tabla 9.3. Comparación multicriterio de las diferentes alternativas

Criterio Método	Eficiencia (45%)	Precio (40%)	Facilidad de uso ¹¹(10%)	Tamaño, peso y usabilidad (5%)	Total
Analizador Continuo MP101M (Sistema Actual)	10	1	7	4	5,80
Impactador + conteo microscópico (Propuesta)	5	10	8	10	7,55
Ciclones + conteo microscópico	6	6	8	0	5,90
Impactador + balanza electrónica	2	8	8	10	5,40
Gravimétrico + Operarios	8	4	4	6	5,90

Tras comparar superficialmente las diferentes alternativas la elección más acertada es la alternativa estudiada en este trabajo. También sería muy interesante realizar un estudio intensivo sobre la utilización de un sistema de ciclones con el conteo mediante un microscopio para ver si se podría utilizar como potencial alternativa.

Se descartan claramente las dos otras alternativas. Utilizar un impactador con una balanza electrónica debido a su baja eficiencia y el método gravimétrico debido a la dependencia constante de personal.

¹¹ Con facilidad de uso se quiere especificar, por ejemplo, el aprendizaje del funcionamiento del software o el método de análisis en laboratorio de la gravimetría.

10. Estudio económico

10.1. Coste del proyecto

En este apartado quedan reflejados todos los gastos para llevar a cabo el proyecto. En la Tabla 10.1 se muestra la amortización de los equipos, en la Tabla 10.2 los costes de ingeniería y en la Tabla 10.3 otros gastos del proyecto.

Tabla 10.1. Estudio económico de los costes de equipos y software

Amortización de equipos y software					
Equipo	Descripción	Valor amortizable (€)	Vida útil (años)	Periodo de utilización (días)	Amortización (€)
1	Ordenador Asus + Programario básico	700	8	100	23,97
2	Web Cam Logitech HD	120	5	30	1,97
3	Microscopio Zeiss	9500	15	1	1,74
4	Cámara Zeiss	1000	10	1	0,27
5	Aumento 10x Zeiss	100	8	1	0,03
6	Licencia SolidWorks 2014	1495	1	30	122,88
7	Licencia Matlab 2013b	2000	1	60	328,77
TOTAL					479,63

Tabla 10.2. Estudio económico de los costes de ingeniería de la alternativa

Coste de ingeniería				
Operación	Descripción	Horas	V/Hora (€)	V/Total (€)
1	Estudio bibliográfico	70	12,00	840,00
2	Tutorización del proyecto	50	40,00	2000,00
3	Diseño del software	150	20,00	3000,00
4	Diseño de los planos	50	20,00	1000,00
5	Ensamblaje de las piezas	20	20,00	400,00
6	Análisis de los resultados	30	20,00	600,00
7	Redacción de la memoria	40	12,00	480,00
Subtotal				8320,00
IVA 21%				1747,20
TOTAL				10067,20

Tabla 10.3. Estudio económico de los gastos generales

Gastos generales					
Ítem	Descripción	Cantidad		V/Unid (€)	V/Total (€)
1	Impresión del proyecto	1		100,00	100,00
2	Material de oficina	1		10,00	10,00
3	Transporte	2		10,00	20,00
	Subtotal				130,00
	IVA 21%				27,30
	TOTAL				157,30

Coste total del proyecto (€)

10704,13

10.2. Coste de la alternativa

Para poder comparar los dos sistemas, se ha realizado un estudio económico de la alternativa propuesta. Éste incluye tanto todos los materiales necesarios (Tabla 10.4) para tener el sistema en funcionamiento como los gastos anuales del equipo (Tabla 10.6).

Los costes de las licencias de Microsoft Windows 7 Professional y de la herramienta ofimática Microsoft Office 2013 vienen incluidas dentro del coste del ordenador.

El software realizado a lo largo de este proyecto se ha construido como software libre, por lo que no incluirá ningún coste adicional para el usuario.

Tabla 10.4. Estudio económico del material de la alternativa

Ítem	Descripción	Cantidad	V/Unid (€)	V/Total (€)
1	Bomba de vacío	1	379,14	379,14
2	Carpintería de aluminio (horas)	12	18,00	216,00
3	Caudalímetro	1	99,00	99,00
4	Chapa de aluminio 2000x1000x0,8 mm	1	17,10	17,10
5	Cinta de aluminio (pack de 2 unidades)	2	10,56	21,12
6	Derivación en T	1	1,00	1,00
7	Filtro de fibra de vidrio (20 unidades)	1	231,00	231,00
8	Formación	1	100,00	100,00
9	Instalación	1	100,00	100,00
10	Manguitos de PVC (5 unidades)	2	1,59	3,18
11	Manómetro	2	6,82	13,64
12	Microscopio óptico	2	68,58	137,16
13	Ordenador	1	300,00	300,00
14	Rodillo automatizado	2	179,53	359,06
15	Transporte	1	50,00	50,00
16	Tubería de goma para vacío (2 metros)	2	5,09	10,18
17	Válvula bypass	1	8,40	8,40
18	Válvula de seguridad	2	11,00	22,00
	Subtotal			2067,98
	IVA 21%			434,28
	TOTAL			2502,26

Tabla 10.5. Consumo de electricidad de la alternativa

Ítem	Descripción	Cantidad	Potencia Nominal (kW)	Tiempo de funcionamiento (h)	Energía consumida (kWh)
1	Bomba	1	0,37	24	8,88
2	Ordenador	1	0,60	24	14,40
3	Alumbrado	1	0,10	1	0,10
4	Climatización	1	1,00	6	6,00
5	Otros	1	0,30	6	1,80
	kWh diarios				31,18
	kWh anuales				11380,70

Tabla 10.6. Costes de operación anuales de la alternativa

Ítem	Descripción	Cantidad	Unidades	V/Unid (€)	V/Total (€)
1	Consumo de electricidad	11380,70	kWh	0,12	1365,68
2	Consumo de agua	72	m ³	1,00	72,00
3	Personal	365	h	18,00	6570,00
4	Cinta de aluminio	1	unidad	5,28	5,28
5	Filtros	1	pack	115,50	115,50
	Subtotal				8128,46
	IVA 21%				1706,98
	TOTAL				9835,44

10.3. Coste del sistema de referencia

Tras varias negociaciones con la empresa Environnement S.A. se ha conseguido el presupuesto para un sistema completo de última generación en análisis de partículas en el aire mediante radiación beta, detallado en la Tabla 10.7.

Tabla 10.7. Estudio económico del sistema actual

Ítem	Descripción	Cantidad	V/Unid (€)	V/Total (€)
1	Monitor Automático de partículas BETA PM10. Modelo MP101M. Marca Environnement s.a. Incluye: Cabezal PM ₁₀ , bomba y tratamiento de residuos nucleares. Método equivalente de la EPA ¹²	1	68000,00	68000,00
2	Opción 1: Módulo CPM por <i>Light Scattering</i> (dispersión de la luz) para medición simultánea en tiempo real de PM ₁₀ , PM _{2,5} y PM ₁ integrado al monitor Beta.	1	13900,00	13900,00
3	Kit de consumibles para el Modelo MP101M (1 año de operación)	3	1980,00	5940,00
4	Cabina con ventilación para exteriores	1	9900,00	9900,00
5	Calibrador de flujo, presión y temperatura. Marca BGI Inc.	1	6200,00	6200,00
	Subtotal			103940,00
	IVA 21%			21827,40
	TOTAL			125767,40

¹² Environmental Protection Agency

Tal como se ha hecho en el apartado 10.2 también se tienen en cuenta los costes de operación anuales.

Tabla 10.8. Consumo de electricidad del método de referencia

Ítem	Descripción	Cantidad	Potencia Nominal (kW)	Tiempo de funcionamiento (h)	Energía consumida (kWh)
1	Bomba	1	0,37	24	8,88
2	Ordenador	1	0,60	24	14,40
3	Analizador Continuo	1	1,00	24	24,00
4	Luces	1	0,10	1	0,10
5	Climatización	1	1,00	6	6,00
6	Otros	1	0,30	6	1,80
	kWh diarios				55,18
	kWh anuales				20140,70

Tabla 10.9. Costes de operación anuales del método de referencia

Costes de operación anuales del método de referencia					
Ítem	Descripción	Cantidad		V/Unid (€)	V/Total (€)
1	Consumo de electricidad	20140,70	kWh	0,12	2416,88
2	Consumo de agua	72	m ³	1,00	72,00
3	Personal	730	h	18,00	13140,00
4	Consumibles	1	unidad	1980,00	1980,00
	Subtotal				17608,88
	IVA 21%				3697,87
	TOTAL				21306,75

10.4. Comparativa económica

Si comparamos el coste de la alternativa propuesta con el sistema de referencia nos encontramos con que la primera se va a vender por 2502,26€ y la segunda por 108996,80€ (sin tener en cuenta el coste de la cabina con ventilación y solamente los consumibles para un año). Esto significa que con el método desarrollado obtenemos un ahorro del 97,7%.

Otro punto a considerar es la comparación entre los gastos anuales de uno y de otro sistema. El método alternativo tiene un coste anual de 9835,44€ y el método de referencia un coste anual de 21306,75€. Esto significa que con el método desarrollado obtenemos un ahorro anual del 53,8%.

Para analizar la rentabilidad de la implantación del proyecto se realiza un estudio económico a 5 años vista.

Tabla 10.10. Rentabilidad del método alternativo

Año	0	1	2	3	4	5
Inversión Inicial (€)	2502,26					
Coste Anual (€)		9835,44	9933,80	10033,13	10133,47	10234,80
Ingreso (€)		11471,31	11586,02	11701,88	11818,90	11937,09
Flujo de caja (€)	-2502,26	1635,87	1652,23	1668,75	1685,44	1702,29
Flujo de caja acumulado (€)	-2502,26	-866,39	785,84	2454,59	4140,02	5842,31

VAN	€ 5.765,27
TIR	60%
PR	1,52 años

En la Para analizar la rentabilidad de la implantación del proyecto se realiza un estudio económico a 5 años vista.

Tabla 10.10 se puede observar la inversión inicial hecha, que es el precio de todos los materiales y el montaje del sistema. El coste anual muestra los costes de operación anuales, incrementando cada año un 1% debido al aumento del coste de vida. El ingreso obtenido viene definido por la diferencia entre los costes de operación y mantenimiento anuales entre el método de referencia (Tabla 10.9) y el método alternativo (Tabla 10.6). Al igual que el coste anual, éste también sufre un aumento del 1% debido al coste de vida.

Debido a que el tipo de interés, fijado por el BCE, es de un 0,25%; obtenemos un VAN muy parecido al flujo de caja acumulado al final del quinto año. Por último, una Tasa Interna de Retorno tan elevada y un periodo de retorno tan bajo nos indican que es una muy buena inversión.

11. Estudio de impacto ambiental y social

Uno de los principales motivos por los que llevar a cabo este proyecto es que puede tener una repercusión tanto ambiental como social muy importante.

Como impacto ambiental es importante aclarar qué clase de fuente radioactiva utiliza el sistema actual. El carbono-14 es un isótopo en el que se produce un proceso de desintegración beta con una baja actividad radioactiva (menos de 90 μ Ci) y tiene un período de semidesintegración¹³ de 5730 años.

El poder de penetración de la radiación beta es mayor que la radiación alfa pero menor que la gamma. Puede ser frenada por unos metros de aire o por una lámina de aluminio.

Tras ver estas dos características, claramente la más preocupante es el altísimo período de semidesintegración como el que se utiliza en el sistema actual, ya que una vez éste deje de funcionar se tendrá que confinar el residuo radioactivo.

Esto le da un punto a favor muy importante a la alternativa propuesta ya que no se utiliza ningún tipo de material peligroso.

Por último, pero no menos importante, el sistema óptico puede tener una importante repercusión social ya que debido a su relativo bajo precio puede ser utilizado en lugares donde sería muy importante para sus habitantes saber qué clase de aire respiran pero que, por desgracia, no tienen los medios suficientes para adquirir un sistema como el que utilizan la mayoría de lugares.

Según el Banco Mundial, el PIB per cápita (uno de los indicadores de riqueza de un país) de los Estados Unidos es de 51748,56\$ y el PIB per cápita de Brasil es de 11339,52\$, ambos en 2012. Esto significa que el PIB per cápita de Brasil es un 78% inferior al PIB per cápita de Estados Unidos, por lo que es complicado que puedan acceder a la última tecnología que ofrecen los sistemas de referencia, pero mucho más asequible obtener un modelo como el de la alternativa propuesta en el trabajo.

¹³ Tiempo que tarda el isótopo en perder la mitad de su energía radiactiva.

12. Cronograma para la realización del prototipo

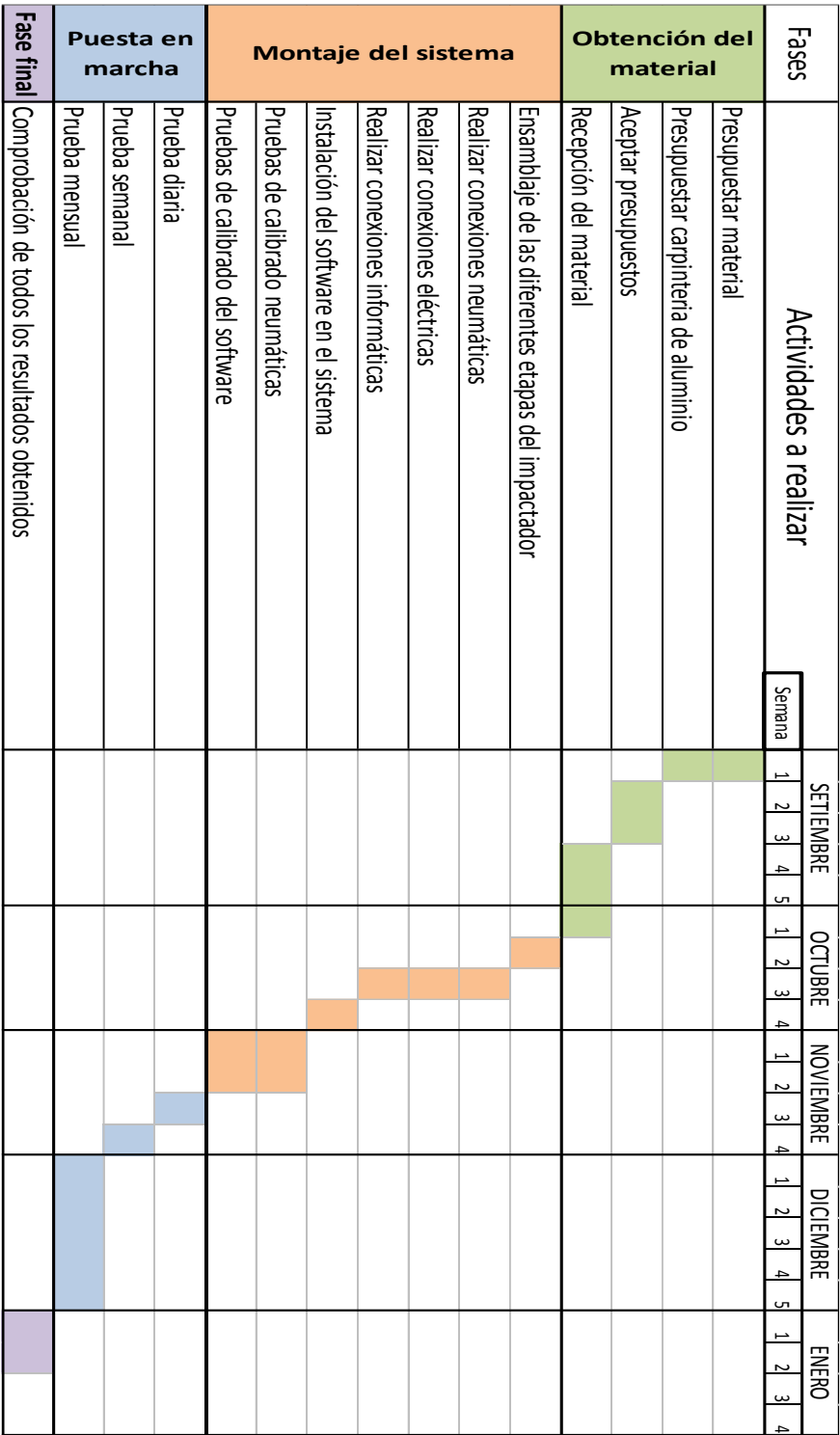


Figura 12.1. Cronograma del prototipo

13. Conclusiones

Tras realizar un estudio bibliográfico intensivo sobre las partículas en el aire y los diferentes métodos de captación y de análisis se ha observado que hay una gran cantidad de libros, publicaciones y artículos que tratan estos temas. Es por ello que el problema no reside en la falta de investigación sino en la falta de recursos para desarrollar de forma práctica los métodos.

Debido a estos motivos, en el presente proyecto se ha desarrollado un método mediante un sistema de captación en un impactador en cascada que se encarga de separar las partículas por rangos de tamaño. Simultáneamente, un microscopio realiza fotografías a las zonas donde las partículas han impactado, pudiendo saber así, mediante el software que se ha desarrollado a lo largo de este proyecto que cuenta las partículas, la concentración de partículas que hay en el aire en un determinado momento.

Solamente hay un inconveniente, y es que no se puede saber con total seguridad cuál es la eficiencia de la alternativa sin la recreación de un prototipo real ya que todo lo que se ha hecho hasta ahora son hipótesis teóricas, solamente simuladas a través de Solidworks y realizando el conteo de capturas microscópicas hechas expresamente para el proyecto. La probabilidad de que exista algún error en la medición existe, sin embargo, el proyecto ha contado con una fase de simulación que no ha presentado importantes variaciones con la hipótesis.

El objetivo principal del proyecto era por lo tanto proponer un método alternativo que redujera los costes. Dicho objetivo ha sido alcanzado, tal y como se refleja en el estudio económico, el sistema alternativo tiene un coste un 97,7% inferior al sistema de referencia. Esta reducción de costes en el método, aumenta la cuota de mercado a la que se puede dirigir, ya que este coste puede ser asumido por países con menos recursos en políticas ambientales o sobre contaminación. Sin embargo, el modelo anterior, con un coste de 125000€ se encontraba restringido a un número limitado de países.

Por lo tanto, el proyecto alcanza un doble objetivo: por un lado, la creación de un método alternativo más económico. Por otro lado, aumenta la cuota de mercado que puede abarcar, teniendo en cuenta que los países con altos niveles de contaminación atmosférica suelen ser países subdesarrollados. Este método, gracias a su bajo coste, podría permitir la difusión y popularización de su uso en un mayor número de países, generando a la vez un mayor control, así como base de datos de carácter global sobre la inmisión de partículas atmosféricas.

14. Agradecimientos

Este trabajo no podría haberse realizado sin los conocimientos adquiridos a lo largo de toda la carrera; aportándome cada una de sus asignaturas las nociones necesarias para desarrollar este estudio.

La realización del presente proyecto final de carrera es fruto de las orientaciones, sugerencias y estímulo del profesor Lázaro Cremades Oliver, quien me ha conducido durante estos meses con un talante abierto y generoso, guiándome sin ser directivo y mostrando en cada momento una inmejorable disposición ante las dudas que durante la realización del mismo me surgieron, aportando valiosas observaciones que en todo momento guiaron esta investigación.

También me gustaría agradecer la ayuda de todos los usuarios de los foros de Matlab y SolidWorks que me han ayudado desinteresadamente.

Y, por supuesto a mis familiares y amigxs que supieron respetar durante este tiempo mis horas de “aislamiento”.

15. Bibliografía

- 12341:1999, U.-E. (s.f.). Calidad del aire. Determinación de la fracción PM₁₀ de la materia particulada en suspensión. Método de referencia y procedimiento de ensayo de campo para demostrar la equivalencia de los métodos de medida al de referencia.
- AENOR. (1999). *UNE-EN 12341:1999. Calidad del aire. Determinación de la fracción PM₁₀ de la materia particulada en suspensión. Método de referencia y procedimiento de ensayo de campo para demostrar la equivalencia de los métodos de medida al de referencia.*
- Baron, P. A., & Willeke, K. (2001). *Aerosol Measurement. Principles, Techniques, and Applications* (Segunda ed.). Estados Unidos de América.
- Beltrán Villegas, D. J., & Rojas, N. Y. (s.f.). *Diseño y construcción de un impactador de cascada para la determinación de la distribución de tamaño de material particulado suspendido en el aire.* Bogotá.
- BOE. (1998). Resolución de 12 de marzo de 1998, de la Dirección General de la Energía, por la que se exime de autorización como instalación radiactiva, al analizador de partículas de la marca «Environnement», modelo MP 101 M. (BOE n. 97 de 23 de abril de 1998, 13691).
- Brockmann, J. E., & Rader, D. J. (2007). APS Response to Nonspherical Particles and Experimental Determination of Dynamic Shape Factor. *Aerosol Science and Technology*, 2(13), 162-172.
- Brook, R. D. (2008). Cardiovascular effects of air pollution. *Clinical Science*, 175-187.
- Dassault Systèmes SolidWorks Corp. (2014). *SolidWorks*. Recuperado el 20 de Abril de 2014, de www.solidworks.com
- de Nevers, N. (2000). *Air Pollution Control Engineering* (Segunda ed.). Singapur: McGraw-Hill chemical engineering series.
- Fernández Patier, R. (2009). *Metodología de la evaluación de la calidad del aire.* Monografías de la Real Academia Nacional de Farmacia.
- Generalitat de Catalunya. (2005). Recuperado el 20 de Febrero de 2014, de Departament de Territori i Sostenibilitat - Medi Ambient i Sostenibilitat: <http://www20.gencat.cat/portal/site/mediambient/>

- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol Technology* (Segunda ed.). Nueva York: Wiley.
- Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC CIEMAT. (2013). *Niveles, composición y fuentes de PM₁₀ y PM_{2.5} en España: Aragón, Asturias, Castilla La Mancha, y Madrid*. Instituto de Salud Carlos III. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. S.D.G. de Calidad del Aire y Medio Ambiente Industrial.
- Langmuir, I., & Blodgett, K. B. (1946). *A Mathematical Investigation of Water Droplet Trajectories*.
- Marple, V. A., & Willeke, K. (1976). Impactor Design. *Atmospheric Environment*, 10, 891-896.
- Martínez, A. P., & Romien, I. (1997). *Introducción al monitoreo atmosférico*.
- Merkus, H. G. (2009). *Particle Size Measurements*. Países Bajos: Springer.
- Molina Esquivel, E. e. (2001). Crisis de asma y enfermedades respiratorias agudas: Contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en Centro Habana. *Revista Cubana de Medicina General Integral [online]*, 17(1), 10-20.
- Oppenheimer, C. (2003). Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815. *Progress in Physical Geography*, 27(2), 230-259.
- Perry, R. H. (2001). *Perry. Manual del Ingeniero Químico*. México: McGraw-Hill.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2012). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}*.
- Sheperd, C. B., & Lapple, C. E. (1939). Flow patterns and pressure drop in cyclone dust collectors. *Industrial and Engineering Chemistry*, 31(8), 972-984.
- Sunyer, J. (2013). *Barcelona Cultura*. Recuperado el 16 de Abril de 2014, de Contaminación atmosférica y enfermedades respiratorias: <http://barcelonacultura.bcn.cat/es/contaminacion-atmosferica-y-enfermedades-respiratorias>
- The MathWorks, Inc. (2014). *MathWorks*. Recuperado el 13 de 03 de 2014, de <http://www.mathworks.es/>

Troposfera Soluciones Sostenibles. (2005). *Portal Temático de Contaminación Atmosférica*. Recuperado el 11 de Febrero de 2014, de Troposfera: <http://www.troposfera.org/>

Umbría, A. (s.f.). Caracterización de partículas en la atmósfera. Técnica de toma de muestras. *Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía*.

United States Environmental Protection Agency. (21 de Marzo de 2014). Recuperado el 29 de Marzo de 2014, de www.epa.gov

University of Florida, Department of Environmental Engineering Sciences. (2013). *Aerosol Science & Engineering*. Recuperado el 10 de Abril de 2014, de <http://aerosol.ees.ufl.edu/>

World Air Quality. (2014). *AQICN*. Recuperado el 01 de Abril de 2014, de <http://aqicn.org>

16. Lista de abreviaciones y símbolos

Símbolo	Unidades	Descripción
AQI	-	Índice de Calidad del Aire
BAM	-	<i>Beta-Particle Attenuation Monitor</i>
BCE	-	Banco Central Europeo
BP	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	BreakPoint
C_c	-	Factor de corrección de Cunningham
C_D	-	Coeficiente de arrastre
CPM	-	Monitoreo Continuo de Partículas
C_{PM}	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Concentración de partículas
d_{50}	μm	Diámetro de corte
d_a	μm	Diámetro aerodinámico
d_b	mm	Diámetro de obstáculo
g	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	Aceleración de la gravedad
HVS	-	<i>High Volume Sampler</i>
ICQA	-	<i>Índex Català de Qualitat de l'Aire</i>
K_H	$\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}\cdot\text{atm}^{-1}$	Constante de Henry
LVS	-	<i>Low Volume Sampler</i>
N	-	Número de orificios
NP	-	Número de partículas
PM	-	<i>Particle Matter</i>
PM_1	-	<i>Particle Matter 1μm</i>
PM_{10}	-	<i>Particle Matter 10μm</i>
$PM_{2,5}$	-	<i>Particle Matter 2,5μm</i>
P_1	Pa	Presión de entrada al orificio
P_2	Pa	Presión de salida del orificio
Q	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	Caudal
Re	-	Número de Reynolds
Re_p	-	Número de Reynolds de partícula
S	mm	Distancia de impacto
Stk	-	Número de Stokes
Stk_{50}	-	Número de Stokes crítico
t	h	Tiempo transcurrido
T	mm	Profundidad del orificio
u	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Velocidad relativa entre el fluido y la partícula

Símbolo	Unidades	Descripción
U	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Velocidad del aire
V	μm^3	Volumen de las partículas
v_s	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Velocidad terminal de asentamiento
W	mm	Diámetro del orificio
ΔP	Pa	Pérdida de carga
μ	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	Viscosidad dinámica
ρ_a	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Densidad del aire
ρ_f	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Densidad de fluido
ρ_p	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Densidad de partícula

Anexo A.

Algoritmos en Matlab

Contenido

1. ALGORITMO INICIO.m
2. ALGORITMO INTERFAZ.m

A.1. Algoritmo Inicio.m

```

function varargout = Inicio(varargin)
% INICIO MATLAB code for Inicio.fig
%     INICIO, by itself, creates a new INICIO or raises the existing
%     singleton*.
%     H = INICIO returns the handle to a new INICIO or the handle to
%     the existing singleton*.
%     INICIO('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in INICIO.M with the given input
arguments.
%     INICIO('Property','Value',...) creates a new INICIO or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%     applied to the GUI before Inicio_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
application
%     stop. All inputs are passed to Inicio_OpeningFcn via varargin.
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only
one
%     instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help Inicio
% Last Modified by GUIDE v2.5 01-Apr-2014 10:33:13
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Inicio_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Inicio_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Inicio is made visible.
function Inicio_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin    command line arguments to Inicio (see VARARGIN)
% UIWAIT makes Inicio wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Inicio_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);

```

```

% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

hardwareInfo = imaqhwinfo;
adaptorNames = hardwareInfo.InstalledAdaptors;
set(handles.listbox4, 'String', adaptorNames);
set(handles.listbox9, 'String', adaptorNames);

% Get default command line output from handles structure

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Caudal
global TiempoAnálisis
Caudal = str2double(get(handles.edit2, 'String'));
TiempoAnálisis = str2double(get(handles.edit1, 'String'));

Interfaz;
% set(Inicio, 'Visible', 'Off');
%close(Inicio);

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of edit4 as text
%        str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of edit4 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of edit3 as text
%        str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of edit3 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in listbox4.
function listbox4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listbox4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global adaptorname10
global deviceID10

hardwareInfo = imaqhwinfo;
adaptorNames = hardwareInfo.InstalledAdaptors;
usersChosenIndex = get(handles.listbox4, 'Value');
adaptorname10 = adaptorNames{usersChosenIndex};

    hardwareInfo2 = imaqhwinfo(adaptorname10);
    devInfo = hardwareInfo2.DeviceInfo;
    if size(devInfo, 2) == 0
        % No camera is attached.
        UserSettings.useSamplePictures = true;
        errorMessage = sprintf('Error in function
InitializeVideoCamera().\nWindows does not see a video camera
attached.\nIf you think there is, then use Device Manager to check\nthe
"Imaging Devices" category. ');
        ME = MException('CameraDetect:NoCameraPresent', errorMessage);
        % Launch Device Manager. Use trailing ampersand, otherwise
program does not continue until user closes Device Manager.
        system('C:\Windows\System32\devmgmt.msc &')
        throw(ME);
    end
    devName = devInfo.DeviceName;
    deviceID10 = devInfo.DeviceID;
    supportedFormats = devInfo.SupportedFormats;

    set(handles.text8, 'String', devName);
    set(handles.listbox6, 'String', supportedFormats);

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns listbox4
contents as cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
listbox4

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function listbox4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listbox4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: listbox controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in listBox9.
function listBox9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listBox9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global adaptorname25
global deviceID25

hardwareInfo = imaqhwinfo;
adaptorNames = hardwareInfo.InstalledAdaptors;
usersChosenIndex = get(handles.listBox9, 'Value');
adaptorname25 = adaptorNames{usersChosenIndex};
    hardwareInfo2 = imaqhwinfo(adaptorname25);
    devInfo = hardwareInfo2.DeviceInfo;
    if size(devInfo, 2) == 0
        % No camera is attached.
        UserSettings.useSamplePictures = true;
        errorMessage = sprintf('Error in function
InitializeVideoCamera().\nWindows does not see a video camera
attached.\nIf you think there is, then use Device Manager to check\nthe
"Imaging Devices" category.');
```

ME = MException('CameraDetect:NoCameraPresent', errorMessage);
 % Launch Device Manager. Use trailing ampersand, otherwise
 program does not continue until user closes Device Manager.
 system('C:\Windows\System32\devmgmt.msc &')
 throw(ME);

```

    end
    devName = devInfo.DeviceName;
    deviceID25 = devInfo.DeviceID;
    supportedFormats = devInfo.SupportedFormats;

    set(handles.text7, 'String', devName);
    set(handles.listBox8, 'String', supportedFormats);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function listBox9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listBox9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in listBox8.
function listBox8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listBox8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

global format25
global adaptorname25

hardwareInfo2 = imaqhwinfo(adaptorname25);
devInfo = hardwareInfo2.DeviceInfo;
usersChosenIndex = get(handles.listbox8, 'Value');
supportedFormats = devInfo.SupportedFormats;
format25 = supportedFormats{usersChosenIndex};

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function listbox8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listbox8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on selection change in listbox6.
function listbox6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listbox6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global format10
global adaptorname10

hardwareInfo2 = imaqhwinfo(adaptorname10);
devInfo = hardwareInfo2.DeviceInfo;
usersChosenIndex = get(handles.listbox6, 'Value');
supportedFormats = devInfo.SupportedFormats;
format10 = supportedFormats{usersChosenIndex};

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function listbox6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listbox6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: listbox controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

A.2. Algoritmo Interfaz.m

```

function varargout = Interfaz(varargin)
% INTERFAZ MATLAB code for Interfaz.fig
%     INTERFAZ, by itself, creates a new INTERFAZ or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = INTERFAZ returns the handle to a new INTERFAZ or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     INTERFAZ('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in INTERFAZ.M with the given input
%     arguments.
%
%     INTERFAZ('Property','Value',...) creates a new INTERFAZ or raises
%     the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
%     are
%     applied to the GUI before Interfaz_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
%     application
%     stop. All inputs are passed to Interfaz_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only
%     one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Interfaz

% Last Modified by GUIDE v2.5 31-Mar-2014 13:11:10

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Interfaz_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Interfaz_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Interfaz is made visible.
function Interfaz_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.

```

```

% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Interfaz (see VARARGIN)
% Choose default command line output for Interfaz
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes Interfaz wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Interfaz_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function text4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

%constantes y cámaras
global adaptornamel0
global deviceIDl0
global formatl0
global adaptornamel25
global deviceID25
global format25

```

```

vidPM25 = videoinput(adaptorname25, deviceID25,format25);%Microscopio
PM2,5
set(vidPM25,'ReturnedColorSpace','grayscale');

vidPM10 = videoinput(adaptorname10, deviceID10, format10);%Microscopio
PM10
set(vidPM10,'ReturnedColorSpace','grayscale');

Densidad=1000;
VolumenMAXPM10=(4/3)*pi*(5E-6)^3;
VolumenMINPM10=(4/3)*pi*(1.25E-6)^3;

VolumenMAXPM25=VolumenMINPM10;
VolumenMINPM25=(4/3)*pi*(0.25E-6)^3;

RepeticionFoto = 10; %cuantas fotos hacemos a la misma cinta, para tener
más muestras

global Caudal
global TiempoAnalisis % entre analisis y analisis (en minutos)
global STOP

ciclo = (24*60/TiempoAnalisis); %(24*60/(TiempoAnalisis/60)); 48 ciclos
en un dia. Muestras cada 30 minutos.
handles.stop=0;%finalizar
STOP=0;
i=1;
j=1;
pause(32*60);%Dejamos 32 minutos de margen antes de empezar (en segundos)

while STOP==0;

    tic
    k=1;

    while k<RepeticionFoto+1
        tic;
        %Foto PM2.5
        tic;
        imgPM25{i} = getsnapshot(vidPM25);
        fname25 = ['imgPM25' num2str(i)];%que nombre le ponemos al archivo
        imwrite(imgPM25{i}, fname25, 'jpg');%guardar el archivo con formato

        %Foto PM10
        imgPM10{i} = getsnapshot(vidPM25);
        fname10 = ['imgPM10' num2str(i)];%que nombre le ponemos al archivo
        imwrite(imgPM10{i}, fname10, 'jpg');%guardar el archivo con formato
        toc;

        pause(12-toc);%paramos 3minutos entre foto y análisis (3-tiempo
operacio)

    %      %Contar PM10

```

```

tic

grayImage = imread(['imgPM10' num2str(i)]);
% Get the dimensions of the image.
% numberOfColorBands should be = 1.
[rows, columns, numberOfColorBands] = size(grayImage);
if numberOfColorBands > 1
    % It's not really gray scale like we expected - it's color.
    % Convert it to gray scale by taking only the green channel.
    grayImage = grayImage(:, :, 2); % Take green channel.
end
% Display the original gray scale image.
% subplot(2, 2, 1);
% imshow(grayImage, []);
% title('Original Grayscale Image', 'FontSize', fontSize);
% % Enlarge figure to full screen.
% set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 1 1]);
% % Give a name to the title bar.
% set(gcf, 'Name', 'Demo by ImageAnalyst', 'NumberTitle', 'Off')

% Let's compute and display the histogram.
[pixelCount, grayLevels] = imhist(grayImage);
% subplot(2, 2, 2);
% bar(grayLevels, pixelCount);
% grid on;
% title('Histogram of original image', 'FontSize', fontSize);
% xlim([0 grayLevels(end)]); % Scale x axis manually.

% Find the gray level of the most common gray level.
[peakCounts, backgroundGL] = max(pixelCount);
% Go down a little bit in case there is variation in the gray levels.
% Fall down the peak until it starts to go back up again
for gl = backgroundGL : -1 : 2
    if pixelCount(gl-1) > pixelCount(gl)
        break;
    end
end
thresholdValue = gl;
% Threshold the image to get a binary image.
binaryImage = grayImage < thresholdValue;
% subplot(2, 2, 3);
% imshow(binaryImage);

% Count the blobs.
[labeledImage, numberOfBlobs] = bwlabel(binaryImage);

% caption = sprintf('Initial Binary Image, before size filtering. %d
blobs.', numberOfBlobs);
% title(caption, 'FontSize', fontSize);

% Get rid of blobs less than 1000 pixels in area.
binaryImage = bwareaopen(binaryImage, 1000);

% Get all the blob properties.
[labeledImage, numberOfBlobs] = bwlabel(binaryImage);
blobMeasurements = regionprops(labeledImage, 'all');

```

```

    allAreas = [blobMeasurements.Area];

    % Label each blob with 8-connectivity, so we can make measurements of
    it
    [labeledImage, numberOfBlobs] = bwlabel(binaryImage, 8);
    % % Apply a variety of pseudo-colors to the regions.
    % coloredLabelsImage = label2rgb (labeledImage, 'hsv', 'k',
    'shuffle');
    % % Display the pseudo-colored image.
    % subplot(2, 2, 4);
    % imshow(coloredLabelsImage);
    % caption = sprintf('Final Binary Image, after size filtering. %d
blobs.', numberOfBlobs);
    % title(caption, 'FontSize', fontSize);
    NumberOfParticlePM10micro(k)=numberOfBlobs;

    %Contar PM25

grayImage = imread(['imgPM25' num2str(i)]);
% Get the dimensions of the image.
% numberOfColorBands should be = 1.
[rows, columns, numberOfColorBands] = size(grayImage);
if numberOfColorBands > 1
    % It's not really gray scale like we expected - it's color.
    % Convert it to gray scale by taking only the green channel.
    grayImage = grayImage(:, :, 2); % Take green channel.
end
% Display the original gray scale image.
% subplot(2, 2, 1);
% imshow(grayImage, []);
% title('Original Grayscale Image', 'FontSize', fontSize);
% % Enlarge figure to full screen.
% set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 1 1]);
% % Give a name to the title bar.
% set(gcf, 'Name', 'Demo by ImageAnalyst', 'NumberTitle', 'Off')

% Let's compute and display the histogram.
[pixelCount, grayLevels] = imhist(grayImage);
% subplot(2, 2, 2);
% bar(grayLevels, pixelCount);
% grid on;
% title('Histogram of original image', 'FontSize', fontSize);
% xlim([0 grayLevels(end)]); % Scale x axis manually.

% Find the gray level of the most common gray level.
[peakCounts, backgroundGL] = max(pixelCount);
% Go down a little bit in case there is variation in the gray levels.
% Fall down the peak until it starts to go back up again
for gl = backgroundGL : -1 : 2
    if pixelCount(gl-1) > pixelCount(gl)
        break;
    end
end
thresholdValue = gl;
% Threshold the image to get a binary image.
binaryImage = grayImage < thresholdValue;
% subplot(2, 2, 3);

```

```
% imshow(binaryImage);

% Count the blobs.
[labeledImage, numberOfBlobs] = bwlabel(binaryImage);

% caption = sprintf('Initial Binary Image, before size filtering. %d
blobs.', numberOfBlobs);
% title(caption, 'FontSize', fontSize);

% Get rid of blobs less than 1000 pixels in area.
binaryImage = bwareaopen(binaryImage, 1000);

% Get all the blob properties.
[labeledImage, numberOfBlobs] = bwlabel(binaryImage);
blobMeasurements = regionprops(labeledImage, 'all');
allAreas = [blobMeasurements.Area];

% Label each blob with 8-connectivity, so we can make measurements of it
[labeledImage, numberOfBlobs] = bwlabel(binaryImage, 8);
% % Apply a variety of pseudo-colors to the regions.
% coloredLabelsImage = label2rgb (labeledImage, 'hsv', 'k', 'shuffle');
% % Display the pseudo-colored image.
% subplot(2, 2, 4);
% imshow(coloredLabelsImage);
% caption = sprintf('Final Binary Image, after size filtering. %d
blobs.', numberOfBlobs);
% title(caption, 'FontSize', fontSize);
NumberOfParticlePM25micro(k)=numberOfBlobs;

    k=k+1;
    toc

    stop(20-toc);

end

%media de particulas

NumberOfParticlePM25micromean(i)=mean(NumberOfParticlePM25micro);
NumberOfParticlePM10micromean(i)=mean(NumberOfParticlePM10micro);

%proporcion de particulas

NumberOfParticlePM10(i)=NumberOfParticlePM10micromean(i)*7087.62;
%7087.62 = superficie total entre superficie que ve el microscopio
NumberOfParticlePM25(i)=NumberOfParticlePM25micromean(i)*7087.62;    %
ve 8 de 33

%Concentracion PM2.5 cada media hora

handles.concentracionPM25max(i)=NumberOfParticlePM25(i)*VolumenMAXPM25*De
nsidad*1E9/(Caudal*TiempoAnalisis);
```

```

handles.concentracionPM25min(i)=NumberOfParticlePM25(i)*VolumenMINPM25*De
nsidad*1E9/(Caudal*TiempoAnalisis);

handles.concentracionPM25(i)=0.1*round((handles.concentracionPM25max(i)+h
andles.concentracionPM25min(i))/(2*0.1));

    set(handles.text6,'String',num2str(handles.concentracionPM25(i)));

    %Concentracion PM10 cada media hora

handles.concentracionPM10max(i)=NumberOfParticlePM10(i)*VolumenMAXPM10*De
nsidad*1E9/(Caudal*TiempoAnalisis);

handles.concentracionPM10min(i)=NumberOfParticlePM10(i)*VolumenMINPM10*De
nsidad*1E9/(Caudal*TiempoAnalisis);

handles.concentracionPM10(i)=round((handles.concentracionPM10max(i)+handl
es.concentracionPM10min(i))/2)+handles.concentracionPM25(i);

    set(handles.text4,'String',num2str(handles.concentracionPM10(i)));

    %Concentracion media PM2.5 diaria (Cada "ciclos" vueltas, coger
valores)

    if ((i/ciclo)/(floor(i/ciclo))==1; %determinar si es un numero
entero, es decir, si han pasado 48 o multiples de 48

handles.concentracionPM25diaria(j)=0.1*round(mean(handles.concentracionPM
25(end-(ciclo-1):end))/0.1); %media de los ultimos 48 valores (un dia)

set(handles.text22,'String',num2str(handles.concentracionPM25diaria(j)));

    %Concentracion media PM10 diaria

handles.concentracionPM10diaria(j)=round(mean(handles.concentracionPM10(e
nd-(ciclo-1):end)));

set(handles.text20,'String',num2str(handles.concentracionPM10diaria(j)));

    %AQI PM10 24h

    if (0<=handles.concentracionPM10diaria(j)) &
(handles.concentracionPM10diaria(j)<=54)
        AQI10(j)=(50/54)*(handles.concentracionPM10diaria(j));

    elseif (55<handles.concentracionPM10diaria(j)) &
(handles.concentracionPM10diaria(j)<=154)
        AQI10(j)=((100-51)/(154-55))*(handles.concentracionPM10diaria(j)-
55)+51;

```

```

elseif (155<handles.concentracionPM10diaria(j)) &
(handles.concentracionPM10diaria(j)<=254)
    AQI10(j)=((150-101)/(254-
155))* (handles.concentracionPM10diaria(j)-155)+101;

elseif (255<handles.concentracionPM10diaria(j)) &
(handles.concentracionPM10diaria(j)<=354)
    AQI10(j)=((200-151)/(354-
255))* (handles.concentracionPM10diaria(j)-255)+151;

elseif (355<handles.concentracionPM10diaria(j)) &
(handles.concentracionPM10diaria(j)<=424)
    AQI10(j)=((300-201)/(424-
355))* (handles.concentracionPM10diaria(j)-355)+201;

elseif (425<handles.concentracionPM10diaria(j)) &
(handles.concentracionPM10diaria(j)<=404)
    AQI10(j)=((400-301)/(504-
425))* (handles.concentracionPM10diaria(j)-425)+301;

elseif 505<=handles.concentracionPM10diaria(j)
    AQI10(j)=((500-401)/(604-
505))* (handles.concentracionPM10diaria(j)-505)+401;

end

%AQI PM25 24h

if (0<=handles.concentracionPM25diaria(j)) &
(handles.concentracionPM25diaria(j)<=12)
    AQI25(j)=(50/12)*(handles.concentracionPM25diaria(j));

elseif (12.1<handles.concentracionPM25diaria(j)) &
(handles.concentracionPM25diaria(j)<=35.4)
    AQI25(j)=((100-51)/(35.4-
12.1))* (handles.concentracionPM25diaria(j)-12.1)+51;

elseif (35.5<handles.concentracionPM25diaria(j)) &
(handles.concentracionPM25diaria(j)<=55.4)
    AQI25(j)=((150-101)/(55.4-
35.5))* (handles.concentracionPM25diaria(j)-35.5)+101;

elseif (55.5<handles.concentracionPM25diaria(j)) &
(handles.concentracionPM25diaria(j)<=150.4)
    AQI25(j)=((200-151)/(150.4-
55.5))* (handles.concentracionPM25diaria(j)-55.5)+151;

elseif (150.5<handles.concentracionPM25diaria(j)) &
(handles.concentracionPM25diaria(j)<=250.4)
    AQI25(j)=((300-201)/(250.4-
150.5))* (handles.concentracionPM25diaria(j)-150.5)+201;

elseif (250.5<handles.concentracionPM25diaria(j)) &
(handles.concentracionPM25diaria(j)<=350.4)

```

```

    AQI25(j)=((400-301)/(350.4-
250.5))* (handles.concentracionPM25diaria(j)-250.5)+301;

    elseif 350.5<=handles.concentracionPM25diaria(j)
        AQI25(j)=((500-401)/(500.4-
350.5))* (handles.concentracionPM25diaria(j)-350.5)+401;

    end

    AQI(j)=round(max([AQI10(j) AQI25(j)]));
    set(handles.text26, 'String', num2str(AQI(j)));

    if (0<=AQI(j)) && (AQI(j)<=50)
        set(handles.text28, 'String', 'Buena');
        set(handles.text30, 'String', 'La calidad del aire se considera
satisfactoria, y la contaminación del aire representa poco o ningún
riesgo.');
```

set(handles.uipanel5, 'BackgroundColor', [0 1 0]);

```

    elseif (51<=AQI(j)) && (AQI(j)<=100)
        set(handles.text28, 'String', 'Moderada');
        set(handles.text30, 'String', 'Las personas extraordinariamente
sensibles deben considerar limitar los esfuerzos físicos y prolongados al
aire libre.');
```

set(handles.uipanel5, 'BackgroundColor', [1 1 0]);

```

    elseif (101<=AQI(j)) && (AQI(j)<=150)
        set(handles.text28, 'String', 'Dañina para la salud de los grupos
sensibles');
```

set(handles.text30, 'String', 'Los niños y ancianos, y personas con
enfermedades respiratorias tales como el asma, deben evitaqr los esfuerzos
físicos excesivos y prolongados al aire libre.');

set(handles.uipanel5, 'BackgroundColor', [1 0.5 0]);

```

    elseif (151<=AQI(j)) && (AQI(j)<=200)
        set(handles.text28, 'String', 'Dañina para la salud');
```

set(handles.text30, 'String', 'Los niños y ancianos, y personas con
enfermedades respiratorias tales como el asma, deben evitar los esfuerzos
prolongados al aire libre; las demás personas, especialmente los niños,
deben limitar los esfuerzos físicos excesivos y prolongados al aire
libre.');

set(handles.uipanel5, 'BackgroundColor', [1 0 0]);

```

    elseif (201<=AQI(j)) && (AQI(j)<=300)
        set(handles.text28, 'String', 'Muy dañina para la salud');
```

set(handles.text30, 'String', 'Las personas extraordinariamente
sensitivas deben evitar todos los esfuerzos excesivos al aire libre; las
demás personas, especialmente los niños, deben limitar los esfuerzos
físicos excesivos al aire libre.');

set(handles.uipanel5, 'BackgroundColor', [0.5 0 0.5]);

```

    else AQI(j) > 300;
        set(handles.text28, 'String', 'Peligrosa');
```

set(handles.text30, 'String', 'Alerta: todo el mundo puede
experimentar graves efectos en su salud.');

set(handles.uipanel5, 'BackgroundColor', [.7 .5 0]);

```

end
end

%Graficos
%Grafico Horaria PM10
axes(handles.axes1);
tH10(i) = now;
init=length(tH10)-9;
if (init<1)
init=1;
end
set(gcf,'color','white');
drawnow;
plot(tH10(init:end),handles.concentracionPM10(init:end),'-
kd','linewidth',1.8)
title('Concentración de PM10 horaria');
xlabel('Tiempo (Hora:Minutos)');
ylabel('Concentración (µg/m3)');
axis auto;
datetick('x','HH:MM');%cambiar a HH:MM
grid on;

%Grafico Horaria PM2,5
axes(handles.axes3);
tH25(i) = now;
init=length(tH25)-9;
if (init<1)
init=1;
end
set(gcf,'color','white');
drawnow;
plot(tH25(init:end),handles.concentracionPM25(init:end),'-
kd','linewidth',1.8)
title('Concentración de PM2,5 horaria');
xlabel('Tiempo (Hora:Minutos)');
ylabel('Concentración (µg/m3)');
axis auto;
datetick('x','HH:MM');%cambiar a HH:MM
grid on;

%Grafico Diaria PM10
if ((i/ciclo))/(floor(i/ciclo))==1; %ciclos de 48

axes(handles.axes2);
tD10(j) = floor(now);
init=length(tD10)-9;
if (init<1)
init=1;
end
set(gcf,'color','white');
drawnow;
plot(tD10(init:end),handles.concentracionPM10diaria(init:end),'-
kd','linewidth',1.8)
title('Concentración de PM10 diaria');
xlabel('Tiempo (Día/Mes)');
ylabel('Concentración (µg/m3)');
axis auto;

```

```

    datetick('x','DD/mmm','keepticks');%cambiar a DD/mm
    grid on;

    %Grafico Diaria PM2,5

    axes(handles.axes4);

    tD25(j) = floor(now);
    init=length(tD25)-9;
    if (init<1)
        init=1;
    end
    set(gcf,'color','white');
    drawnow;
    plot(tD25(init:end),handles.concentracionPM25diaria(init:end),'-
kd','linewidth',1.8)
    title('Concentración de PM2,5 diaria');
    xlabel('Tiempo (Día/Mes)');
    ylabel('Concentración (µg/m3)');
    axis auto;
    datetick('x','DD/mmm','keepticks');%cambiar a DD/mm
    grid on;

    j=j+1;

end
    %Fin Grafico
    i=i+1;
    toc;

    if i>101 %i>101

        delete(['imgPM10' num2str(i-3)]); %delete (i-100)Borrar fotos mas
antiguas que la 100
        delete(['imgPM25' num2str(i-3)]);
    end

    pause(27*30-toc); %esperamos (27'-toc)

    if get(handles.stop,'UserData')==1
        break;
    end

end

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global STOP
STOP=1;

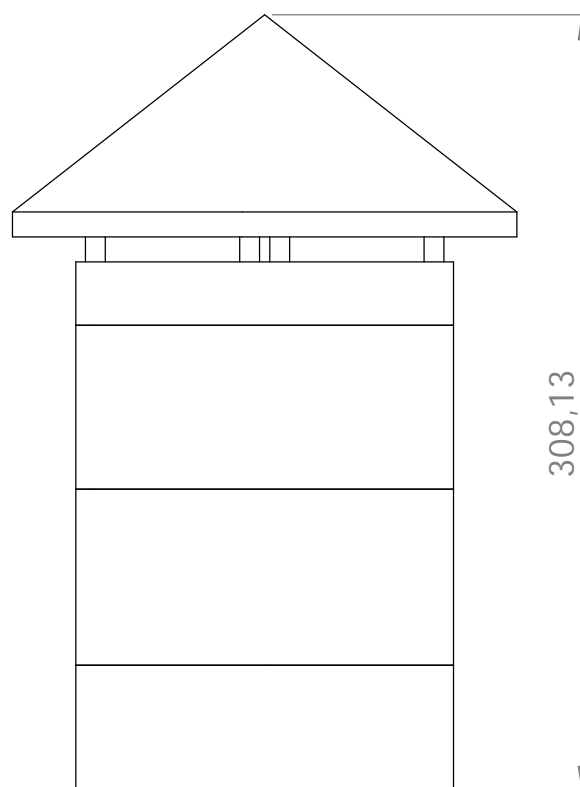
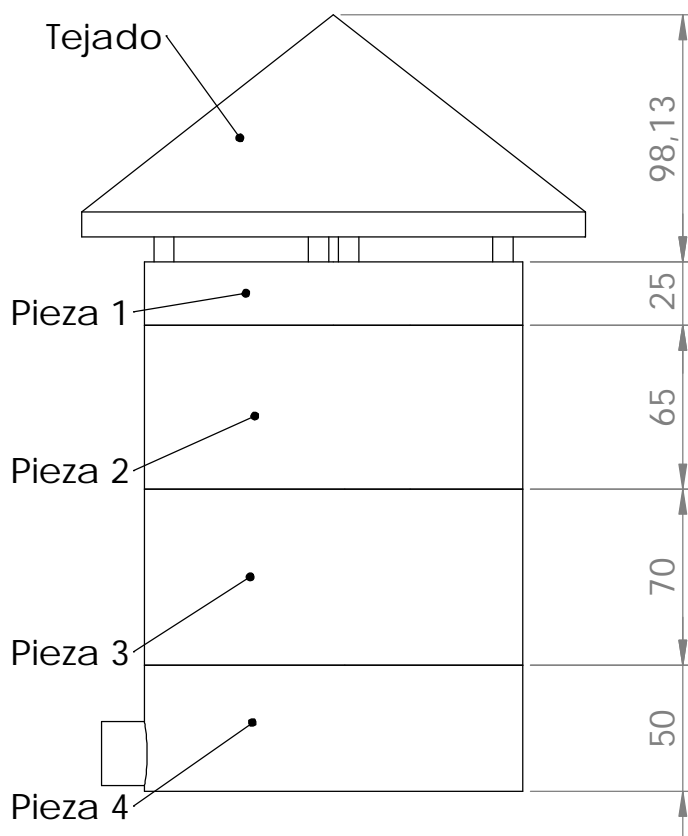
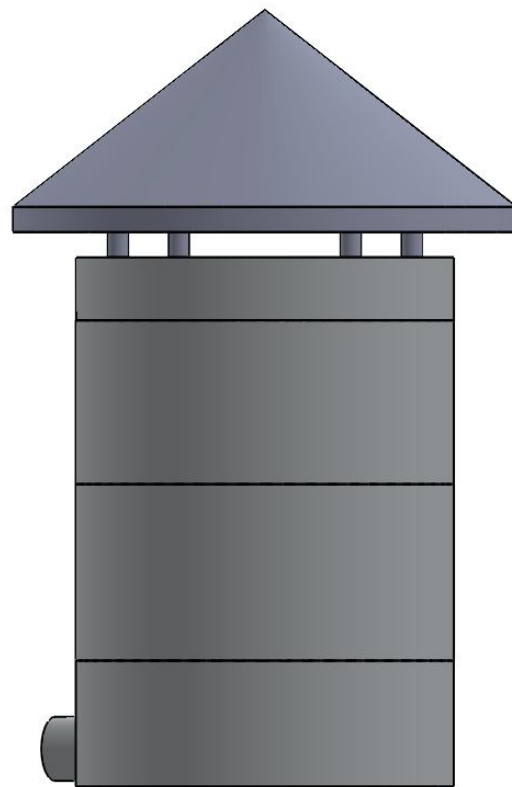
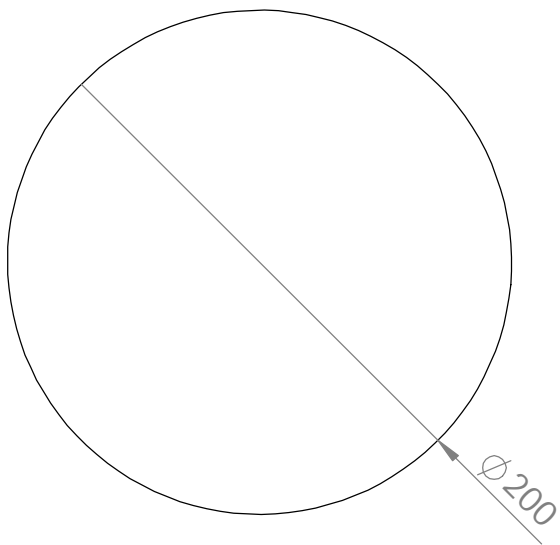
```


Anexo B.

Planos del prototipo

Contenido

1. PLANO DE IMPACTADOR
2. PLANO DE PIEZA 1: $>PM_{10}$
3. PLANO DE PIEZA 2: PM_{10}
4. PLANO DE PIEZA 3: $PM_{2,5}$
5. PLANO DE PIEZA 4: $<PM_{2,5}$
6. PLANO DE TEJADO



DESIGNACIÓN DEL PLANO:

Impactador

NÚMERO DE PLANO:

1

ESCALA:

1:3

OBSERVACIONES:

Si no se indica lo contrario:
Las cotas se expresan en mm

	NOMBRE:	FECHA:
DIBUJADO:	CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ	CUATRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014
VERIFICADO:	CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ	CUATRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014



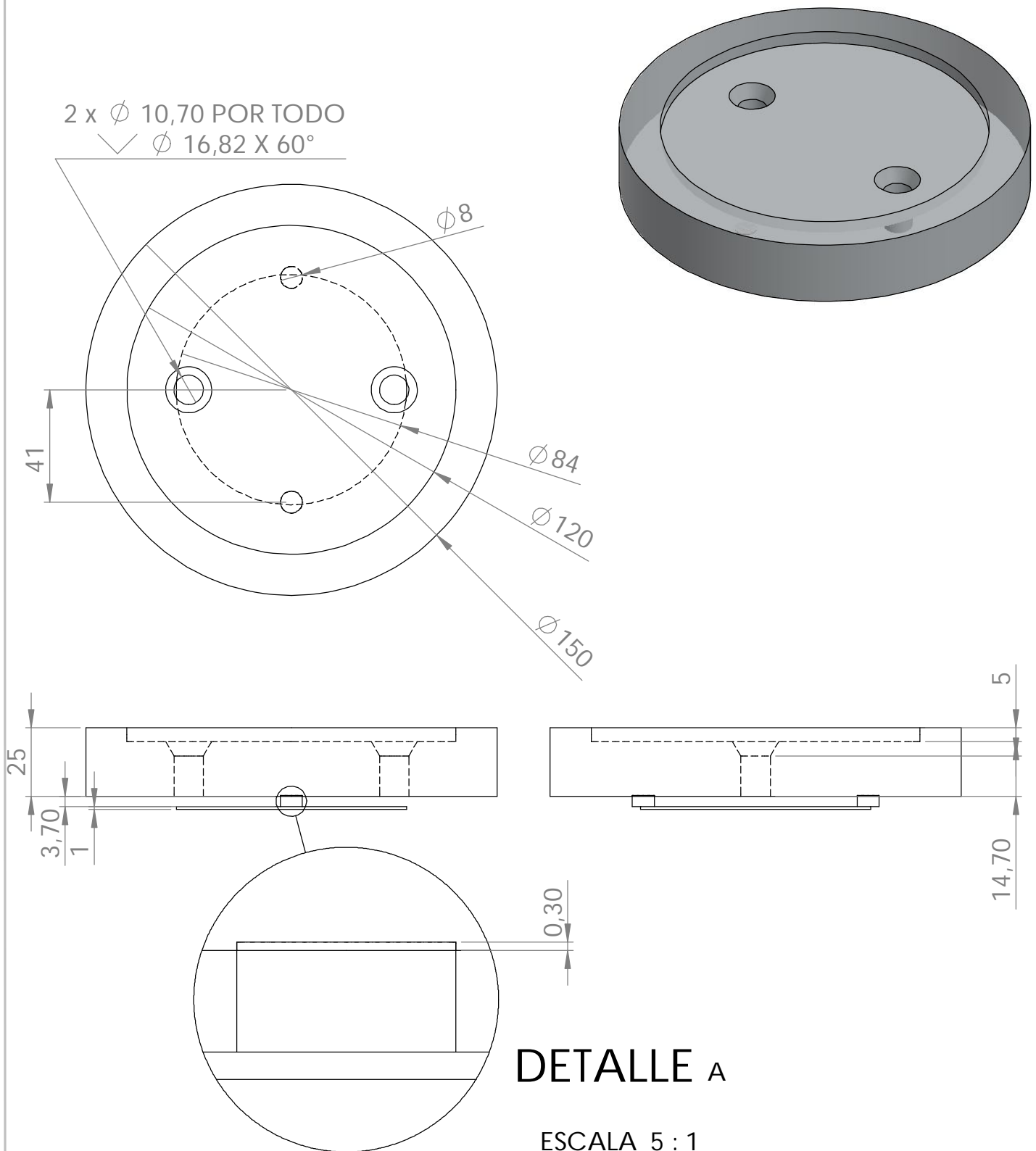
**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TÍTULO DEL PROYECTO:

Estudio de viabilidad de un sistema óptico para medir la concentración de inmisión de partículas atmosféricas

A4

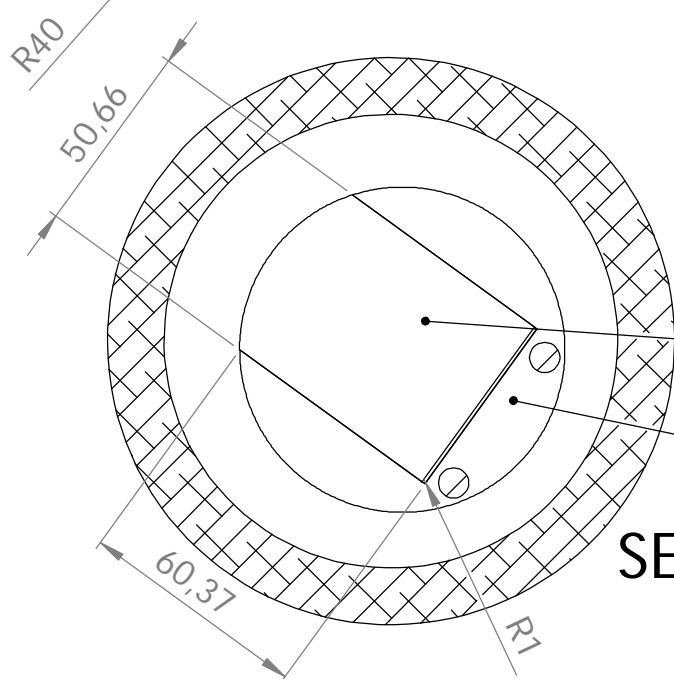
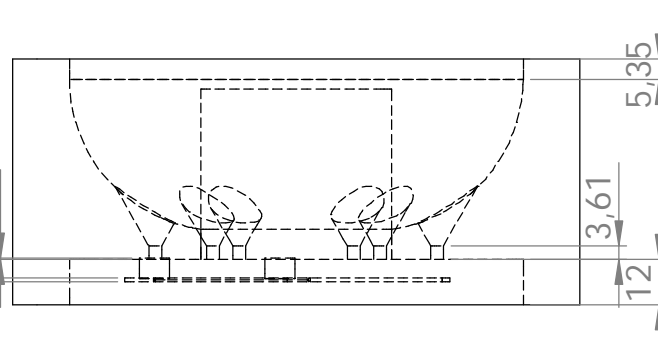
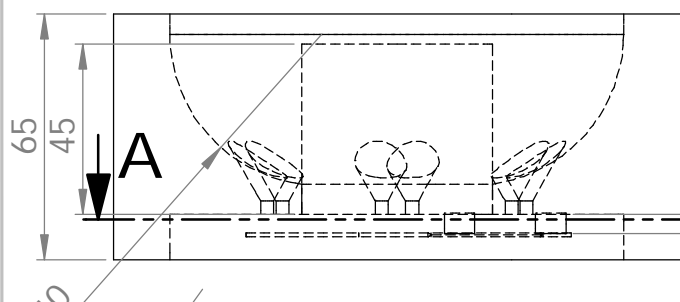
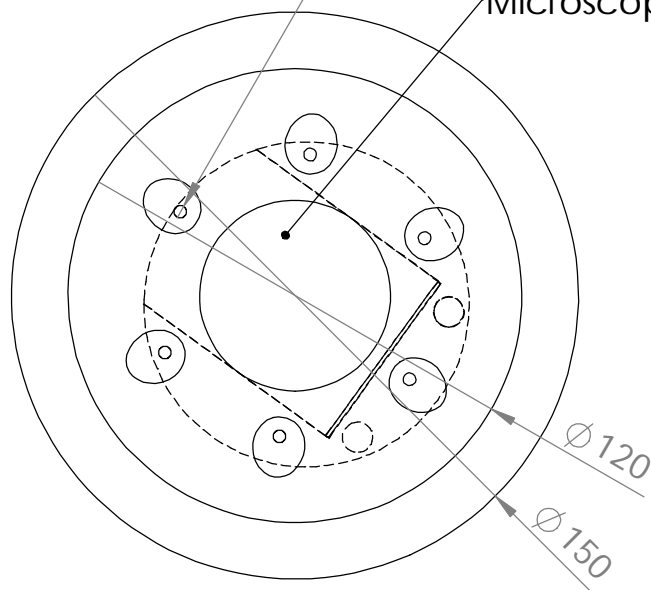
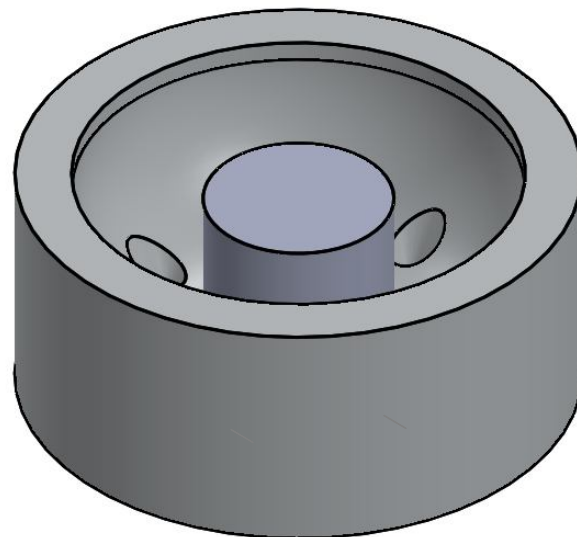


DESIGNACIÓN DEL PLANO:		NÚMERO DE PLANO:	ESCALA:	MATERIAL:	OBSERVACIONES:
Pieza 1: >PM10		2	1:2	Aleación 1060	Si no se indica lo contrario: Las cotas se expresan en mm
NOMBRE:	FECHA:				
DIBUJADO:	CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ	CUATRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014			
VERIFICADO:	CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ	CUATRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014			
  Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA				TÍTULO DEL PROYECTO:	A4
				Estudio de viabilidad de un sistema óptico para medir la concentración de inmisión de partículas atmosféricas	

6 x ϕ 3,40 POR TODO

✓ ϕ 8,47 X 60°

Microscopio



Zona de impactación
con cinta transportadora

Zona de impactación

SECCIÓN A-A

ESCALA 1 : 2

DESIGNACIÓN DEL PLANO:

Pieza 2: PM10

NÚMERO DE PLANO:

3

ESCALA:

1:2

MATERIAL:

Aleación 1060

OBSERVACIONES:

Si no se indica lo contrario:
Las cotas se expresan en mm

NOMBRE:

CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ

FECHA:

CUATRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014

DIBUJADO:

CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ

VERIFICADO:

CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ

CUATRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TÍTULO DEL PROYECTO:

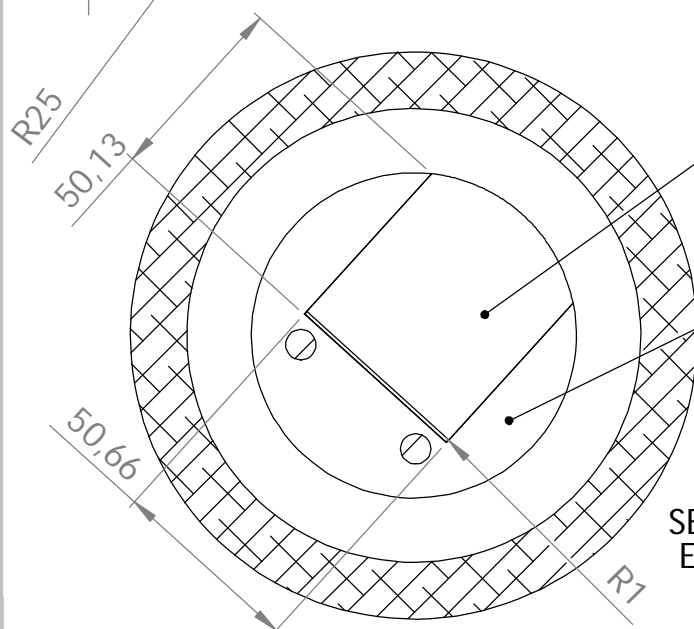
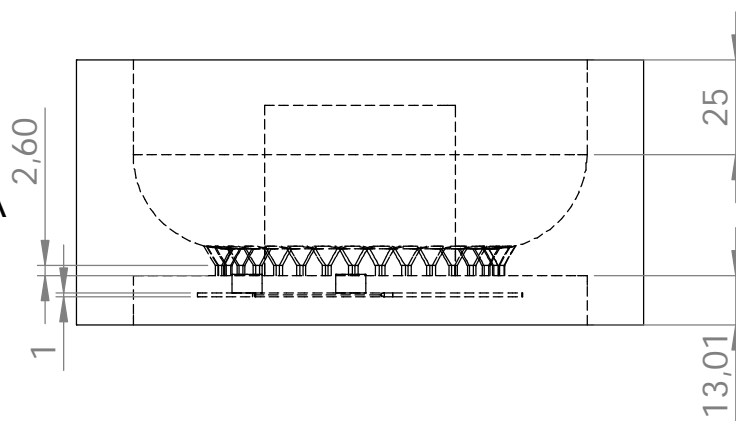
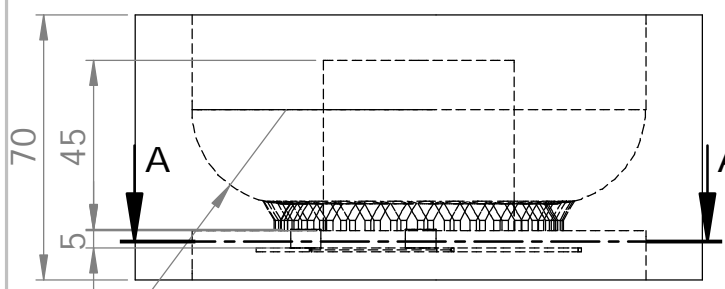
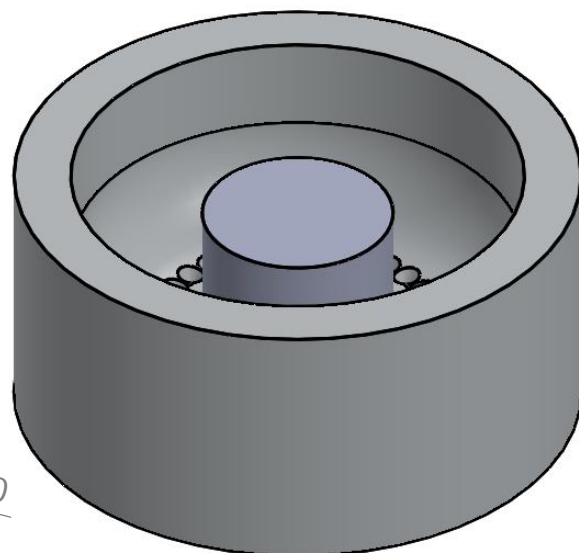
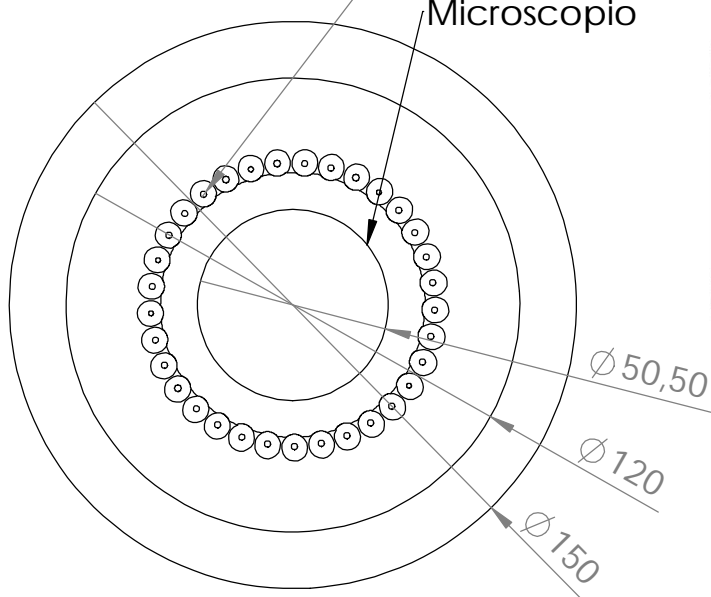
Estudio de viabilidad de un sistema óptico para medir la concentración
de inmisión de partículas atmosféricas

A4

33 x \varnothing 1,60 POR TODO

✓ \varnothing 6,67 X 60°

Microscopio



Zona de impactación
con cinta transportadora

Zona de impactación

SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2

DESIGNACIÓN DEL PLANO:

Pieza 3: PM2,5

NÚMERO DE PLANO:

4

ESCALA:

1:2

MATERIAL:

Aleación 1060

OBSERVACIONES:

Si no se indica lo contrario:
Las cotas se expresan en mm

NOMBRE:

CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ

FECHA:

CUATRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014

DIBUJADO:

CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ

VERIFICADO:

CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ

CUATRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014



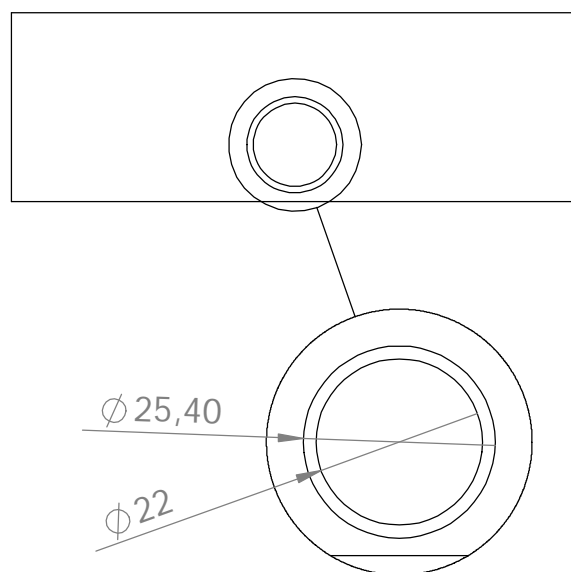
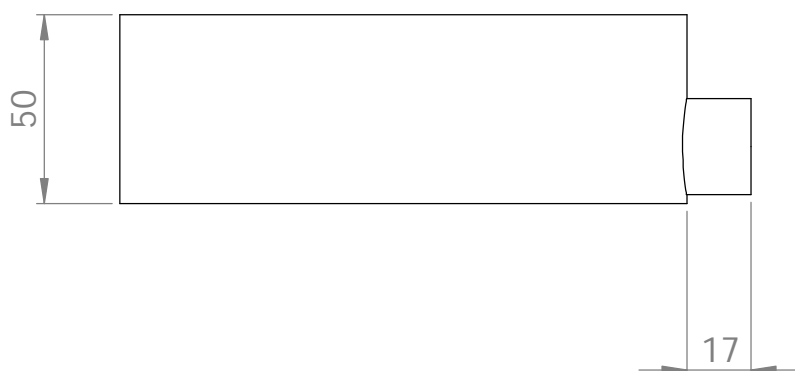
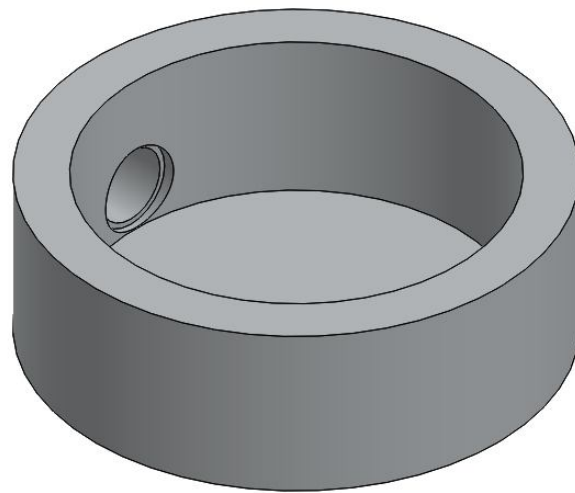
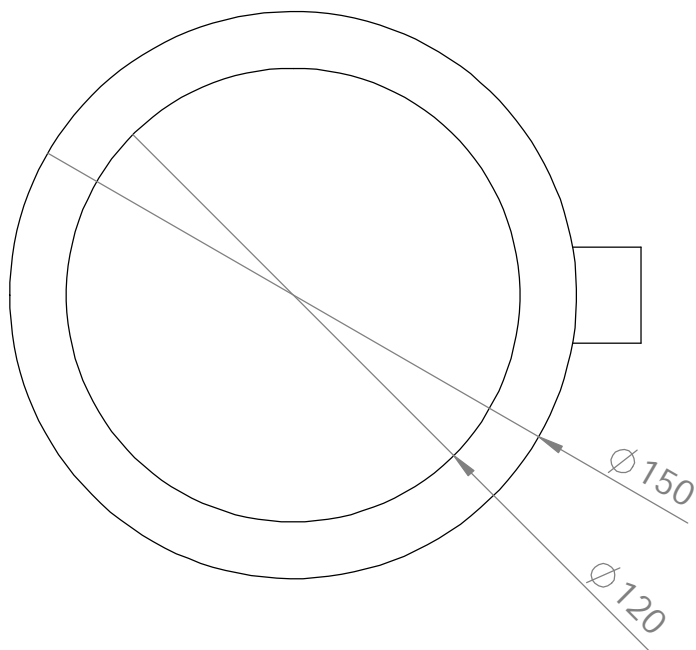
Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TÍTULO DEL PROYECTO:

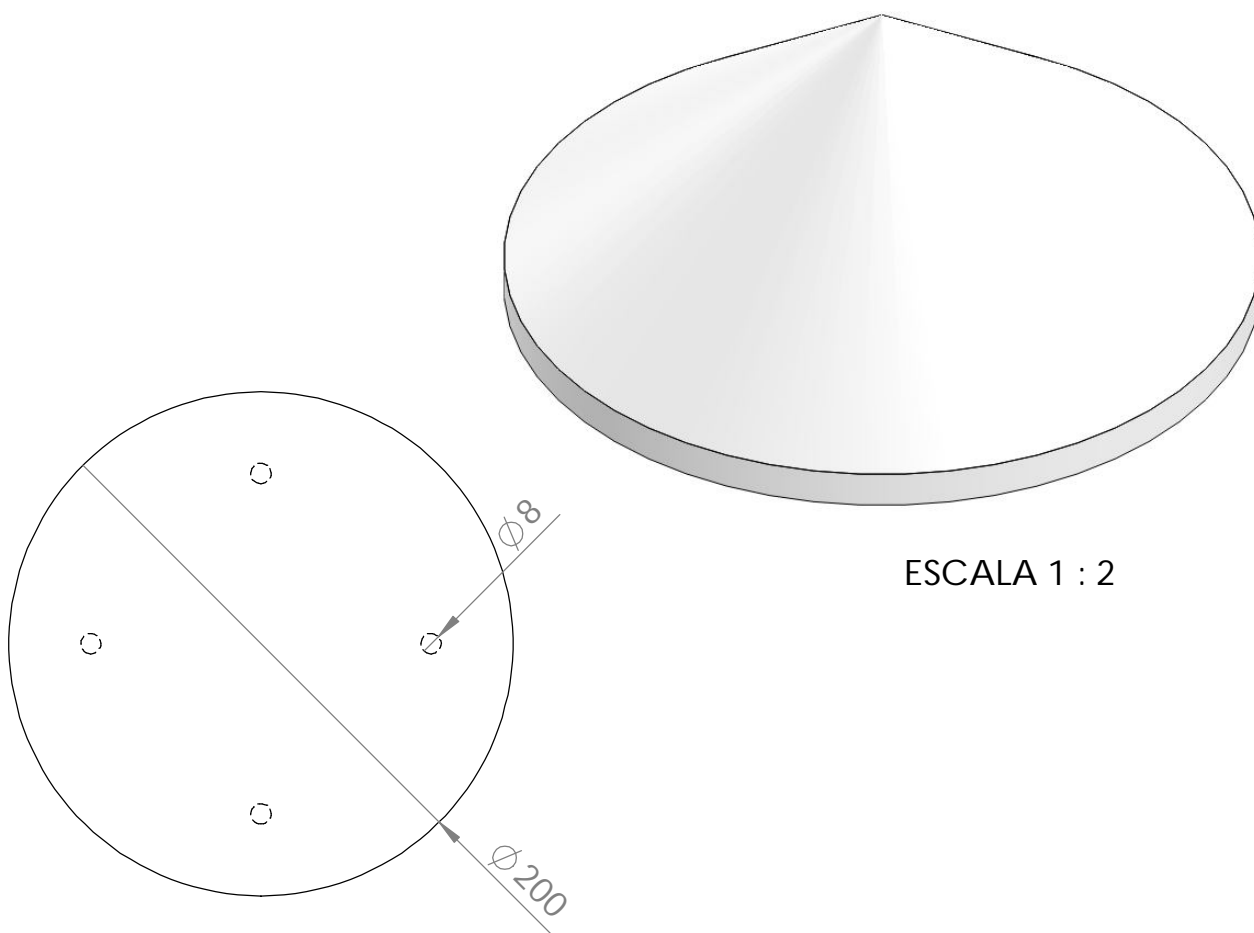
Estudio de viabilidad de un sistema óptico para medir la concentración
de inmisión de partículas atmosféricas

A4

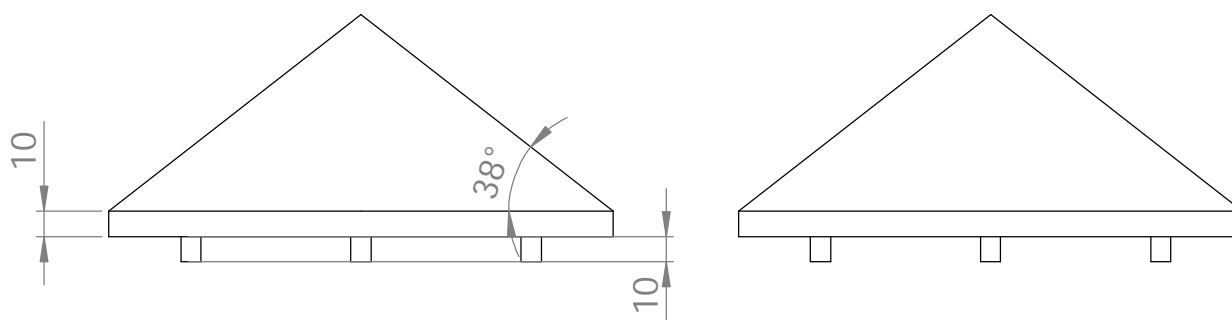


DETALLE A
ESCALA 1 : 1

DESIGNACIÓN DEL PLANO:		NÚMERO DE PLANO:	ESCALA:	MATERIAL:	OBSERVACIONES:
Pieza 4: <PM2,5		5	1:2	Aleación 1060	Si no se indica lo contrario: Las cotas se expresan en mm
NOMBRE:		FECHA:			
DIBUJADO:	CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ	CUATRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014			
VERIFICADO:	CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ	CUATRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014			
  Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA			TÍTULO DEL PROYECTO:		A4
			Estudio de viabilidad de un sistema óptico para medir la concentración de inmisión de partículas atmosféricas		



ESCALA 1 : 2



DESIGNACIÓN DEL PLANO:		NÚMERO DE PLANO:	ESCALA:	MATERIAL:	OBSERVACIONES:
Tejado		6	1:3	PVC Rígido	Si no se indica lo contrario: Las cotas se expresan en mm
	NOMBRE:	FECHA:			
DIBUJADO:	CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ	CUADRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014			
VERIFICADO:	CARLOS GARCÍA RODRÍGUEZ	CUADRIMESTRE DE PRIMAVERA 2014			
  <div>Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona</div> <div>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA</div>			TÍTULO DEL PROYECTO:		A4
			Estudio de viabilidad de un sistema óptico para medir la concentración de inmisión de partículas atmosféricas		

